

ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧУВАННЯ ТА ТОРГІВЛІ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧУВАННЯ ТА ТОРГІВЛІ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

**ПАК АНДРІЙ ОЛЕГОВИЧ**

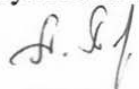
УДК 621.365.5:664

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**«РОЗРОБКА НАУКОВИХ ОСНОВ ІНДУКОВАНОГО**  
**ТЕПЛОМАСООБМІНУ ТА ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ В ПРОЦЕСАХ**  
**ТА ОБЛАДНАННІ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ»**

Спеціальність 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних  
та фармацевтичних виробництв  
Технічні науки

Подається на здобуття наукового  
ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 А.О. Пак

Науковий консультант:

Погожих Микола Іванович,  
доктор технічних наук, професор



ЗАСВІДЧУЮ ІДЕНТИЧНІСТЬ ЦЬОГО  
ПРИМІРНИКА З ІНШИМИ ПРИМІР-  
НИКАМИ ДИСЕРТАЦІЙ, ПОДАНОЇ  
ДО СПЕЦІАЛІЗОВАНОЇ ВЧЕНОЇ  
РАДИ № 64.088.01

 ОНИЩЕНКО В.М.

Харків – 2017

## АНОТАЦІЯ

*Пак А.О.* Розробка наукових основ індукованого тепломасообміну та його використання в процесах та обладнанні харчових виробництв. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв. – Харківський державний університет харчування та торгівлі Міністерства освіти і науки України, Харків, 2017.

У вступі сформульовано актуальність обраної теми, обґрунтовано необхідність проведення комплексних фундаментальних досліджень із розвитку теоретичних основ індукованого тепломасообміну (ІнТМО). Сформульовано мету та завдання дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі обґрунтовано перспективність пошуку індукованих процесів, одним із яких є ефект ІнТМО. Визначено низку особливостей протікання ІнТМО, фізичний механізм яких залишається недостатньо розкритим. Установлено, що необхідність розвитку теоретичних основ ефекту ІнТМО та його моделювання полягає в тому, що розробка феноменологічних фізичних і фізико-математичних моделей для описання кінетичних та динамічних закономірностей, механізмів та рушійних сил ІнТМО надасть можливість виявити перспективи його використання в різних технологіях та техніці й ефективно керувати ним відповідно до обраної мети його застосування з отриманням заданих результатів або продукції із заданими властивостями.

У другому розділі сформульовано гіпотезу ефекту ІнТМО. Установлено, що ефект ІнТМО спостерігається в термостаті. У виділеному об'ємі всередині термостата знаходяться рідина і газ, також може міститися суха речовина. Тиск у термостаті постійний і дорівнює атмосферному. Із навколишнім середовищем термостат сполучається через обтюратор, що

являє собою отвір у термостаті, із розміщеним у ньому капілярно-пористим тілом. Для активації ефекту ІнтМО використовується механічна енергія потоку повітря, який рухається відносно зовнішньої поверхні обтюратора.

Сам ефект ІнтМО полягає в переході системи від нестійкої рівноваги до стійкої, який супроводжується розсіюванням теплоти за рахунок переходу рідкої фази в термостаті в газовий стан та її видалення через обтюратор.

Необхідними і достатніми умовами для спостереження і регулювання ефекту ІнтМО є наступні.

1. Наявність флуктуацій газу в об'ємі обтюратора.
2. Тепловміст термостата має бути настільки великим, щоб компенсувати теплоту, винесену з термостата паром рідини, що випарувалася.
3. Ефект спостерігається за кінцевий проміжок часу.
4. Флуктуації в об'ємі обтюратора можуть бути просторові і часові. Стан газового середовища термостата описується замкнутими лініями навколо атрактора рівного постійній Больцмана.
5. За флуктуації температури обтюратор повинен мати здатність «виносу» рідини за рахунок капілярних сил в навколишнє середовище.
6. Температура термостата може бути будь-якою, при цьому температура рідини знаходиться всередині її граничного циклу.

Виходячи із законів збереження, для ІнтМО встановлено, що потік маси з термостата індукує потік теплоти до його внутрішнього середовища. Саме цей факт визначає ефективність розсіювання енергії під час ІнтМО.

З огляду на вищевикладене, наукова концепція роботи полягає у такому: теорія – індукування тепломасообміну в термостаті з обтюратором флуктуаціями параметрів газу в обтюраторі сприятиме ефективному розсіюванню енергії на випаровування рідини в термостаті; техніка – термостат з обтюратором, що містить рідину та (або) вологе колоїдне капілярно-пористе тіло, являє собою керований тепломасообмінний апарат для харчової промисловості.

У третьому розділі проведено аналіз процесу тепломасообміну в термостаті методом фазового простору, за яким встановлено, що система «навколишнє середовище – внутрішнє середовище термостата» є проточною по відношенню до теплової енергії та маси системою, у якій спостерігаються процеси самоорганізації, що в сукупності зумовлює ефективне розсіювання теплової енергії за рахунок фазових переходів I роду.

Установлено, що одним із параметрів порядку ефекту ІнтМО є здібність рідини всередині термостата переходити до газового стану, обумовлена взаємодією її з сухими речовинами. З огляду на це, для рідини всередині термостата введено поняття «системна рідина» або «системна вода».

Досліджено системну воду сировини, для якої тепломасообмін є частиною технологічної обробки. Установлено, що внесення таких добавок, як пектин, цукор, еламін, крохмаль, концентрати тваринних білків (Сканпро 91, 95), напівфабрикат кістковий харчовий у плодово-ягідну сировину та сировину тваринного походження приводить до зменшення на 10...20% кількості системної води, яка бере участь у ІнтМО. Відзначено, що частина системної води, яка не випаровується за температури менше ніж 100 °С, не замерзає за температури 0 °С, не витікає тощо, визначає вимоги до умов зберігання харчової сировини та продуктів.

Для дослідження динамічної поведінки системної води харчових систем під час ІнтМО розроблено нову методику аналізу ЕПР-спектрів. Дослідженнями за цією методикою модельних тіл з крохмалю і з клейковини встановлена наявність двох форм зв'язку системної води з сухими речовинами даних модельних тіл. При цьому зміна тангенсів кута нахилу від молярної маси крохмалю і від його мольної концентрації в модельних тілах, доводить наявність як мінімум трьох структур системної води. Отримані результати є вихідними для управління рівновагою між фазами в термостаті.

Досліджено ІнтМО в прототипі апарата для випарювання, концентрування та згущення, який є найпростішим варіантом організації

цього ефекту та являє термостат з обтюратором, що утримує рідину та газ. Візуальним спостереженням та за кінетиками температури складових внутрішнього середовища термостата під час ІнтМО, де як рідка фаза по чергово використовувалися етиловий спирт та вода, встановлена неможливість досягнення рідиною у внутрішньому середовищі термостата температури кипіння за умови протікання ІнтМО.

Моделюванням ІнтМО за наявності твердої, рідкої та газової фаз усередині термостата з розривами між фазами встановлений основний параметр порядку ефекту ІнтМО – наявність суцільності газового середовища всередині термостата за парціальним тиском пари рідини.

Встановлено, що продуктивність термостата за випаруваною рідиною визначається продуктивністю обтюратора, яка є одним із чинників, за допомогою якого можливе керування ІнтМО на практиці. Розрахунками показано: питома продуктивність робочої поверхні термостата в 1,7 разу більша порівняно з продуктивністю випаровування з відкритої поверхні води за тих же температури (75 °С) та швидкості руху ( $v=10$  м/с) над поверхнею, що вигідно вирізняє ІнтМО.

Моделювання сушіння та гідротермічної обробки з ІнтМО сировини з високою поруватістю або високим ступенем усадки (об'єм пустот – 30...50% об'єму термостата) встановлено, що характер ІнтМО за наявності розривів в твердій фазі не відрізняється від характеру ІнтМО за їх відсутності. Такий же результат отриманий і під час моделювання обробки з ІнтМО сировини з частинками, що мають газонепроникні включення. Моделюванням ІнтМО за горизонтальної орієнтації сировини з газонепроникними включеннями встановлено, що різні шари колоїдного капілярно-пористого тіла досягли рівноважного вологовмісту з різницею тривалості в 10% загальної тривалості процесу тепломасообміну, що доводить: границя розділу «навколишнє середовище – внутрішнє середовище термостата» знаходиться в об'ємі обтюратора.

Моделюванням вертикальної орієнтації сировини з газонепроникними включеннями доведено: під час ІнтМО має місце спрямованість характеру протікання процесу тепломасообміну. Наявність спрямованості процесу тепломасообміну є ознакою керованості ІнтМО та його універсальності по сировині.

Розрахунком теплового балансу ІнтМО встановлено, що під час даного ефекту наявний дефіцит теплоти, який становить 25...30% від необхідної кількості. Відзначено, що спостережуваний факт свідчить про виконання роботи над системою, яка індукується потоком повітря, який рухається відносно обтюратора термостата. Доведено: робота потоку повітря, що рухається відносно обтюратора, є тим керуючим параметром, за допомогою якого організовується «запуск» ІнтМО. Доведено, температура і витрати повітря, що рухається відносно термостата, не чинять істотного впливу на характер ІнтМО і не є баластом енергії. Дослідженнями кінетики потоку теплоти, яка витрачається всередині термостата, за різної швидкості потоку повітря встановлено, що інтенсивність ІнтМО може регулюватися в межах 15...20% швидкістю потоку повітря (від 4 до 13 м/с), що рухається відносно обтюраторів. Визначено, що для кутів обдування від 35° до 55° енергоефективність ІнтМО менша у 2 рази порівняно з кутами 0° та 90°, за яких досягається найбільша енергоефективність.

У четвертому розділі теоретичними дослідженнями виявлені особливості механізму та рушійних сил ІнтМО. Отримано наближений розв'язок задачі про розподіл температури та вологовмісту в термостатах циліндричної та паралелепіпедної форми за межових умов третього та першого роду методом R-функцій сумісно з методом малого параметра та сумісно з проєкційним методом Бубнова–Гальоркіна. Відзначено, що застосування розроблених моделей, які базуються на класичних диференціальних рівняннях тепломасообміну, навіть із застосуванням R-функцій, не відтворює ефект ІнтМО.

Обґрунтовано фізико-математичне моделювання ІнтМО як вирішення теплової задачі, а не тепломасообмінної. Вирішенням рівняння теплопровідності відносно функції розвитку потужності дисипативних структур усередині термостата під час ІнтМО, за допомогою якої враховується масообмін, знайдено її аналітичний вигляд. Доведена коректність уведення даної функції для описання ІнтМО та інженерних розрахунків апаратів із варіюванням параметрів порядку та керуючих параметрів ІнтМО.

У п'ятому розділі визначено вимоги до елементів конструкції апаратів з ІнтМО. Розроблено концептуальні рішення конструкцій апаратів з ІнтМО для виконання наступних технологічних операцій, які застосовуються в харчовій промисловості: сушіння; гідротермічна обробка; випарювання, концентрування або згущення; охолодження та термостатування; ректифікація, перегонка або дистиляція.

Відмічено, що наведені рішення апаратів з використанням ІнтМО є універсальними. Їх універсальність полягає в можливості використання одного апарата для виконання будь-якої із описаних технологічних операцій за мінімальних конструкційних змін у наявному апараті.

На основі концептуальних рішень розроблено апарат безперервної дії для гідротермічної обробки круп з ІнтМО, де кінцевою продукцією є швидковідновлювані каші, що не потребують варіння.

Розраховано апарат для гідротермічної обробки круп з ІнтМО за емпіричними і стандартними рівняннями теплового й масового балансів з урахуванням особливостей ефекту, що використовується. Розрахунками доведено, що економічний ефект розробки досягається за рахунок скорочення кількості використовуваних технологічних операцій, виконання основних операцій в одному апараті та за рахунок скорочення енерговитрат на одиницю продукції більш ніж у 1,3 разу у порівняно з традиційними способами. При цьому в апараті можна проводити гідротермічну обробку, сушіння, термостатування, випарювання за умови використання відповідного

тепломасообмінного модуля, що доводить його універсальність. Розробки підтверджені патентом України на корисну модель «Установка для гідротермічної обробки та сушіння крупи». Розроблено проект ТУ У «Каші швидковідновлювані».

У шостому розділі дослідженнями окремих функціонально-технологічних властивостей та показників якості продукції, отриманої після таких технологічних операцій, як сушіння, гідротермічна обробка та випарювання з ІнтМО, доведено високу якість отриманої продукції порівняно з аналогічною продукцією, що отримується традиційними способами. Виконання означених технологічних операцій проводилися у створених прототипах термостатів, конструкція яких обумовлена змістом операції, що виконується.

Результати, отримані в роботі, пройшли апробацію на ТОВ «Терра», ТОВ «Спільне україно-німецьке підприємство «Злаки», ПСП ім. Т.Г. Шевченка. Результати досліджень упроваджені в навчальний процес ХДУХТ.

**Ключові слова:** індукований тепломасообмін, системна вода, термостат, обтюратор, сушіння, гідротермічна обробка, випарювання, ректифікація.



## ANNOTATION

*Pak A.O.* Development of scientific bases of the induced heat and mass transfer and its application in the processes and equipment of food industry. – Manuscript.

Dissertation for the Doctor's degree of technical science by speciality 05.18.12 – Processes and Equipment of Food, Microbiological and Pharmaceutical Industries. – Kharkiv State University of Food Technology and Trade of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2017.

In the introduction the relevance of the chosen topic is formulated, the necessity of carrying out complex fundamental researches on the development of theoretical foundations of induced heat and mass transfer (hereinafter referred to as InHMT) was substantiated. The purpose and tasks of the research, scientific novelty and practical importance of the obtained results are formulated.

In the first chapter the availability of the search for induced processes, one of which is the effect of the InHMT, is substantiated. A number of peculiarities of the InHTM leakage are determined, the physical mechanism of which remains undiagnosed. It is established that the necessity of development of the theoretical foundations of the InHMT effect and its modeling is that the development of phenomenological physical and physical-mathematical models for describing the kinetic and dynamic patterns, mechanisms and driving forces of InHMT will enable to identify the availability of its use in various technologies and techniques and effectively manage it according to the chosen purpose of its application to obtain the given results or products with the given properties.

In the second chapter the hypothesis of the InHMT effect is formulated. It is established that the effect of InHMT is observed in a thermostat. In the allocated volume inside the thermostat are liquid and gas, or it may contain a dry substance. The pressure in the thermostat is constant and equals the atmospheric pressure. With the environment the thermostat is connected through a obturator, which is a hole in the thermostat, with a capillary-porous body in it. The InHMT effect are

activated by the mechanical energy of the air flow, which moves relative to the outer surface of the obturator.

The InHMT effect itself consists in the evolve of the system from the unstable equilibrium to the stable, which is accompanied by the dissipation of heat due to the transition of the liquid phase in the thermostat to the gas state and its removal through the obturator.

Necessary and sufficient conditions for observing and regulating the effect of InHMT are as follows.

1. The presence of fluctuations in the volume of the obturator.
2. The heat content of the thermostat should be so large as to compensate for the heat that has passed from the thermostat with a vapor of evaporated liquid.
3. The effect is observed for the final time interval.
4. Fluctuations in volume of the obturator can be spatial and temporal. The state of the gas environment of the thermostat is described by closed lines around the attractor of equal Boltzmann constant.
5. At temperature fluctuations, the obturator must have the ability to "remove" the liquid due to capillary forces in the environment.
6. The temperature of the thermostat can be any one, with the temperature of the liquid inside its boundary cycle.

Based on the conservation laws, for InHMT it has been established that the mass flow from the thermostat induces a flow of heat to its internal environment. It is this fact that determines the efficiency of energy dissipation during the InHMT.

In view of the above, the scientific concept of the work is as follows: the theory – the induction of heat and mass transfer in a thermostat with the obturator by the fluctuations of the parameters of the gas in the obturator will contribute to the efficient dissipation of energy for the evaporation of the liquid in the thermostat; the technique – thermostat containing a liquid and (or) a wet colloidal capillary-porous body with the obturator is a controlled heat and mass transfer apparatus for the food industry.

In the third chapter an analysis of the heat and mass transfer process in the thermostat by the phase space method has been carried out, which states that the system "the environment – the internal environment of the thermostat" is running in relation to the thermal energy and mass of a system, in which there are processes of self-organization, which collectively leads to efficient dissipation of thermal energy due to phase transitions of the first order.

It is established that one of the parameters of the order of the effect of InHMT is the ability of the fluid inside the thermostat to pass to the gas state, due to its interaction with dry substances. In view of this, the term "system fluid" or "system water" is introduced for the liquid inside the thermostat.

The system water of raw materials, for which heat and mass transfer is a part of technological processing, is investigated. The introduction of such additives as pectin, sugar, elamine, starch, concentrates of animal proteins (Scanpro 91, 95), semi-finished bone meal in fruit materials and raw materials of animal origin has resulted in a decrease by 10...20% of the amount of system water, which participates in InHMT. It is noted that part of system water that does not evaporate at temperatures below 100 °C does not freeze at 0 °C, does not flow, etc., defines the requirements for the conditions of storage of food raw materials and products.

To study the dynamic behavior of system water of food systems during the InHMT, a new method for analyzing EPR-spectra was developed. Investigations on this technique of model bodies from starch and gluten have established the presence of two forms of bound of system water with dry substances of these model bodies. At the same time, the change of the tangents of the angle of versus from the molar mass of starch and its molar concentration in the model bodies proves the presence of at least three structures of system water. The results obtained are output data for controlling the equilibrium between phases in the thermostat.

The InHMT in the prototype of the apparatus for evaporation, concentration and condensation is investigated. It is the simplest way of organizing this effect. It is a thermostat with obturator and liquid and gas inside. The visual observation and

the kinetics of the temperature of the internal thermostat environment during the InHMT, where the liquid phase was alternately used with ethanol and water, established the inability to reach the liquid in the internal environment of the thermostat boiling point under the condition of organization of InHMT.

In the modeling of InHMT in the presence of solid, liquid and gas phases inside the thermostat with phase rupture the main parameter of the order of the effect of InHMT is established – the presence of continuity of the gas medium inside the thermostat by the partial pressure of the liquid vapor.

It has been established that the performance of the thermostat by evaporating liquid is determined by the performance of the obturator, which is one of the factors by which it is possible to control the InHMT in practice. Calculations show: the specific performance of the working surface of the thermostat is 1.7 times greater than the evaporation rate from the open surface of the water at the same temperature (75 °C) and the velocity ( $v=10$  m/s) above the surface, which distinguishes the InHMT favorably.

The modeling of drying and hydrothermal treatment with InHMT of raw materials with high porosity or high shrinkage (the volume of interstices - 30...50% of the volume of the thermostat) has established that the nature of InHMT in the presence of ruptures in the solid phase does not differ from the nature of InHMT in their absence. The same result is obtained during the modeling of treatment with InHMT raw materials with particles having gas-tight inclusions. The simulation of the InHMT for the horizontal orientation of raw materials with gas-tight inclusions found that different layers of colloid capillary-porous body reached equilibrium moisture content with a difference in the duration of 10% of the total duration of the heat and mass transfer process, which proves: the boundary surface of the system "environment – the internal environment of the thermostat" is in the volume of the obturator.

The modeling of vertical orientation of raw materials with gas-tight inclusions has been proved: during the InHMT there is an orientation of the nature of the process of heat and mass transfer. The presence of the direction of the heat

and mass transfer process is a sign of controllability of InHMT and its universality on raw materials.

The calculation of the thermal balance of the InHMT has established that during this effect there is a deficit of heat, which is 25...30% of the required amount. It is noted that the observable fact indicates the performance of work on a system, which is induced by the flow of air moving relative to the thermostat obturator. It is proved: the work of the airflow moving relative to the obturator is the controlling parameter by which the "start" of the InHMT is organized. It is proved that the temperature and flow of air moving relative to the thermostat do not have a significant effect on the nature of the InHMT and is not a ballast of energy. Investigations of the kinetics of the heat flowing within the thermostat at different air flow velocities have shown that the intensity of the InHMT can be controlled within the range of 15...20% of the velocity of air (from 4 to 13 m/s) moving relative to the obturators. It is determined that for the corners of the blow from  $35^\circ$  to  $55^\circ$ , the energy efficiency of the InHMT is less than 2 times compared to the angles of  $0^\circ$  and  $90^\circ$ , which achieves the highest energy efficiency.

In the fourth chapter theoretical investigations revealed the peculiarities of the mechanism and the forces of the InHMT. An approximate solution to the problem of the distribution of temperature and moisture content in cylindrical and parallelepiped shape thermostats under the boundary conditions of the third and the first kind by the method of R-functions is obtained, in conjunction with the method of a small parameter, and is compatible with the Bubnov-Galerkin projection method. It is noted that the application of developed models based on classical differential equations of heat and mass transfer, even with the use of R-functions, does not reproduce the InHMT effect.

Physical and mathematical modeling of InHMT as a solution of a thermal problem, and not heat-mass exchange, is substantiated. The solution of the heat equation in relation to the development of the power of dissipative structures inside the thermostat during the InHMT, which takes into account the mass transfer, has found its analytical form. The correctness of the introduction of this function is

proved for the description of the InHMT and engineering calculations of the devices with the variation of the parameters of the order and control parameters of the InHMT.

In the fifth chapter defines the requirements for the elements of the design of devices with InHMT. Conceptual solutions of the constructions of devices with InHMT for the following technological operations that are used in the food industry: drying; hydrothermal processing; evaporation, concentration or condensation; cooling and thermostating; rectification or distillation.

It is noted that the above solutions of devices using InHMT are universal. Their universality is the ability to use one apparatus to perform any of the described technological operations with minimal constructional changes in the existing apparatus.

On the basis of conceptual solutions, a continuous apparatus for hydrothermal processing of cereals with InHMT has been developed, where the final product is quick-cooking kasha, which do not require cooking.

The device for hydrothermal processing of cereals with InHMT is calculated on the basis of empirical and standard equations of thermal and mass balance, taking into account features of the used effect. The calculations prove that the economic effect of development is achieved by reducing the number of used technological operations, performing basic operations in one apparatus and reducing energy consumption per unit of production by more than 1.3 times compared with traditional methods. In this case, the device can be used for hydrothermal treatment, drying, thermostating, evaporation, where provided the use of a suitable heat and mass exchange module. It is proving its universality. Developments are confirmed by the patent of Ukraine on the utility model "Installation for hydrothermal processing and drying of cereals". The project of TU "Quick-cooking kasha" was developed.

In the sixth chapter studies of certain functional and technological properties and quality indicators of products obtained after such technological operations as drying, hydrothermal processing and evaporation with InHMT, have proved the

high quality of the received products in comparison with analogous products obtained by traditional methods. The performance of the specified technological operations was carried out in prototypes of thermostats, the construction of which is due to the content of the operation being performed.

The results obtained in the work were tested at LLC "Terra", LLC "Joint Ukrainian-German Enterprise "Zlaki", PAE them. T.G. Shevchenko. The results of the research are implemented in the educational process of KSUFTT.

**Keywords:** induced heat and mass transfer, system water, thermostat, obturator, drying, hydrothermal processing, evaporation, rectification.

### Список публікацій здобувача:

1. Погожих М. І., Пак А. О., Цуркан М. М. Сушіння плодово-ягідної сировини способом змішаного теплопідводу зі штучним пороутворенням: монографія. Харків: ХДУХТ, 2009. 102 с. *Внесок здобувача: розробка технологічних схем та конструкційних особливостей сушарки для переробки плодово-ягідної сировини способом змішаного теплопідводу зі штучним пороутворенням.*

2. Вода в пищевых продуктах и для пищевых продуктов: монографія / Н. И. Погожих, В. В. Евлаш, А. И. Торяник, А. О. Пак и др. Харьков: ХГУПТ, 2013. 177 с. *Внесок здобувача: отримання нових наукових даних про стан та структуру системної води харчових систем із крохмалю методом ЕПР-спінових міток, участь в узагальненні висновків.*

3. Гідротермічна обробка круп із використанням принципів сушіння змішаним теплопідводом : монографія / М. І. Погожих, А. О. Пак та ін. Харків: ХДУХТ, 2014. 170 с. *Внесок здобувача: постановка завдань дослідження та розробка концептуального рішення апарата для гідротермічної обробки із застосуванням сушіння змішаним теплопідводом, участь в узагальненні результатів.*

4. Перцевой Ф. В., Теймурова А. Т., Погожих М. І., Пак А. О. Вивчення механізму дії добавок Сканпро на структурно-механічні властивості драглів // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: зб. наук. пр. / Харк. нац. техн. ун-т сільськ. госп-ва ім. П. Василенка. Х.: ХНТУСГ, 2008. Вип. 74. С. 146–153. *Внесок здобувача: участь у постановці завдань дослідження, проведення експериментальних досліджень з визначення видів зв'язку системної води агарових драглів калориметричним методом.*

5. Погожих М. І., Пак А. О. Метод исследования интенсивности испарения влаги с поверхности материала в процессе сушки // Наукові праці ОНАХТ: зб. наук. пр. / Одеськ. нац. акад. харч. техн. Одеса: ОНАХТ, 2008.



Вип. 32(35). С. 97–100. *Внесок здобувача: розробка конструкції пристрою для дослідження інтенсивності випаровування води з харчової сировини під час сушіння.*

6. Погожих М. І., Пак А. О., Жеребкін М. В. Исследование кинетики температуры и кинетики сушки при получении быстровосстанавливаемой каши // Наукові праці ОНАХТ: зб. наук. пр. / Одеськ. нац. акад. харч. техн. Одеса: ОНАХТ, 2009. Вип. 35. Т. 2. С. 101–104. *Внесок здобувача: постановка завдання дослідження, участь у розробці експериментального стенду та методиці проведення вимірювань кінетики температури та маси сировини під час гідротермічної обробки.*

7. Погожих М. І., Пак А. О., Жеребкін М. В. Дослідження плинучості вологої сировини в функціональній ємності прямокутного перерізу // Східно-європейський журнал передових технологій. 2009. № 6/5(42). С. 56–59. *Внесок здобувача: постановка завдання дослідження, розробка конструкції пристрою для дослідження плинучості вологої харчової сировини, визначення діапазону раціональних значень товщини тепломасообмінного модуля.*

8. Постнов Г. М., Пак А. О., Чеканов М. А. Визначення енергії ультразвукових коливань, що розсіялась під час ультразвукової обробки м'ясної сировини // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. праць / Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. Х.: ХДУХТ, 2009. Вип. 1. С. 518–523. *Внесок здобувача: участь у постановці завдань дослідження, розробка алгоритму розрахунку результатів експериментів з дослідження розсіяної енергії ультразвукових коливань під час ультразвукової обробки м'ясної сировини.*

9. Міщенко Т. В., Погожих М. І., Пак А. О. Колориметричне дослідження сушеної чорної смородини // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. праць / Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. Х.: ХДУХТ, 2009. Вип. 2. С. 436–442. *Внесок здобувача: участь у постановці завдань дослідження, розробка математичного алгоритму та здійснення математичної обробки*

*результатів експериментів з колориметричних досліджень сировини з високим вмістом флавоноїдів.*

10. Дюкарева Г. І., Головка Т. М., Пак А. О., Серік М. В. Дослідження впливу НКХ та еламіну форми зв'язку вологи в паштетах калориметричним методом // Східно-європейський журнал передових технологій. 2009. № 4/9 (40). С. 32–34. *Внесок здобувача: визначення форм зв'язку системної води сировини тваринного походження з додаванням напівфабрикату кісткового харчового низькотемпературним калориметричним методом та встановлення закономірностей змін у формах зв'язку води в ній під час зберігання.*

11. Пак А. О., Євтушенко А. В. Дослідження стану вологи пастоподібних напівфабрикатів у процесі заморожування, розморожування, зберігання // Східно-європейський журнал передових технологій. 2010. № 3/10(45). С. 54–56. *Внесок здобувача: визначення низькотемпературним калориметричним методом форм зв'язку системної води сировини рослинного походження з додаванням пектину та цукру і встановлення закономірностей змін у формах зв'язку води в ній під час зберігання.*

12. Одарченко А. М., Пак А. О., Євтушенко А. В. Дослідження змін вмісту каротиноїдів та вітаміну С фруктових начинок за різних температур зберігання // Східно-європейський журнал передових технологій. 2010. № 1/6(43). С. 65–68. *Внесок здобувача: розробка алгоритму математичної обробки експериментальних досліджень з визначення вмісту вітаміну С та каротиноїдів у рослинній сировині з додаванням пектину та цукру.*

13. Перцевой Ф. В., Дьяков О. Г., Пак А. О., Обозна М. В. Використання фізичних методів досліджень для вивчення вмісту вільної та зв'язаної вологи сирного продукту м'якого // Харчова наука та технологія. 2011. № 2. С. 74–77. *Внесок здобувача: визначення низькотемпературним калориметричним методом форм зв'язку системної води молоковмісної сировини з додаванням пектину та крохмалю і встановлення закономірностей змін у формах зв'язку води в ній під час зберігання.*

14. Головка М. П., Пак А. О., Чуйко М. М. Вивчення гігроскопічних властивостей макаронних виробів, збагачених біоорганічними сполуками кальцію // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства та торгівлі : зб. наук. пр. / Харк. держ. ун-т харч. та торг. Х.: ХДУХТ, 2011. Вип. 2. С. 245–250. *Внесок здобувача: визначення тензометричним методом форм зв'язку системної води крохмальутримуючої сировини і встановлення закономірностей змін у формах зв'язку води в ній під час зберігання.*

15. Погожих М. І., Ромоданов І. С., Пак А. О. Методика дослідження стану вологи в капілярно-пористих колоїдних тілах методом ЕПР-спінових міток // Східно-європейський журнал передових технологій. 2011. № 2/6(50). С. 22–24. *Внесок здобувача: участь у постановці завдань дослідження, розробка алгоритму математичної обробки ЕПР-спектрів спінміченої сировини, написання програм для розрахунку в пакеті MathCad.*

16. Янчева М. О., Пак А. О., Яковлєва Ю. В. Вплив композиції кріопротекторної дії на кількість вимороженої вологи в м'ясних січених напівфабрикатах // Обладнання та технології харчових виробництв: зб. наук. пр. / Дон. нац. ун-т ек. та торг. ім. М. Туган-Барановського. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського. 2011. Вип. 27. С. 281–285. *Внесок здобувача: визначення форм зв'язку системної води сировини тваринного походження та встановлення закономірностей змін у формах зв'язку води в ній під час зберігання.*

17. Погожих М. І., Пак А. О., Міщенко Т. В., Жеребкін М. В. Внутрішні чинники процесу гідротермічної обробки круп з використанням принципів ЗТП-сушіння // Східно-європейський журнал передових технологій. 2011. № 5/3(53). С. 60–63. *Внесок здобувача: проведення теоретичного аналізу чинників процесу гідротермічної обробки круп з використанням реалізації індукованого тепломасообміну для сушіння харчової сировини..*

18. Погожих М. І., Пак А. О., Чеканов М. А., Жеребкін М. В. Математична модель кінетики температури сировини під час ЗТП-сушіння //

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях : зб. наук. праць / Нац. техн. ун-т «ХПІ». Х.: НТУ«ХПІ», 2011. № 43. С. 7–12. *Внесок здобувача: розробка теоретичної моделі кінетики температури сировини під час застосування для її сушіння індукованого тепломасообміну.*

19. Погожих М. І., Пак А. О., Жеребкін М. В. Дослідження умов зберігання та показників якості швидковідновлювальних каш, отриманих сушінням змішаним теплопідводом // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства та торгівлі : зб. наук. праць / Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. Х.: ХДУХТ, 2011. Вип. 1(13). С. 21–26. *Внесок здобувача: участь у постановці завдання дослідження, встановлення закономірностей змін показників якості швидковідновлюваних каш під час їх зберігання.*

20. Погожих М. І., Пак А. О., Жеребкін М. В. Пористість швидковідновлюваної каші, отриманої сушінням змішаним теплопідводом // Наукові праці ОНАХТ: зб. наук. праць / Од. нац. акад. харч. техн. Одеса: ОНАХТ, 2011. Вип. 40. Т. 1. С. 54–57. *Внесок здобувача: участь у постановці завдань дослідження та написання програм для розрахунку експериментальних результатів для швидковідновлюваних каш, отриманих тензометричним методом, в пакеті MathCad.*

21. Погожих М. І., Пак А. О., Жеребкін М. В. Функція розподілення потужності дисипативних структур всередині ФЄ під час ЗТП-сушіння // Східно-європейський журнал передових технологій. 2012. № 2/12(56). С. 63–68. *Внесок здобувача: розробка алгоритму знаходження аналітичного вигляду функції розвитку потужності дисипативних структур у колоїдних капілярно-пористих тілах під час застосування індукованого тепломасообміну для зневоднення даної сировини.*

22. Погожих М. І., Пак А. О., Пак А. В., Жеребкін М. В. Дослідження системної вологи крохмалю зернових культур методом ЕПР // Східно-європейський журнал передових технологій. 2012. № 5/6(59). С. 62–66.

*Внесок здобувача участь у постановці завдань дослідження, розробка алгоритму математичної обробки ЕПР-спектрів вологої спінміченої сировини під час її зневоднення, написання програм для обробки експериментальних даних.*

23. Погожих М. І., Пак А. О., Пак А. В., Мольський О. С. Дослідження системної води крохмалів тензометричним та ЕПР- методом // Технологічний аудит та резерви виробництва. 2013. № 2/1(10). С. 31–35. **Стаття у виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз.** *Внесок здобувача: участь у постановці завдань дослідження, встановленні закономірностей динамічної поведінки системної води колоїдних капілярно-пористих тіл із крохмалю в залежності від його молярної маси та молярної концентрації.*

24. Погожих М. І., Пак А. О., Чеканов М. А., Іштван Є. О., Павлюк І. М. Дослідження системної води харчової сировини термодинамічними та молекулярно-кінетичними методами // Східно-європейський журнал передових технологій. 2014. № 5/11(71). С. 42–46. **Стаття у фаховому виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз.** *Внесок здобувача: узагальнення результатів експериментальних досліджень та наведення кореляції між даними, отриманими різними молекулярно-кінетичними та термодинамічними методами.*

25. Погожих М. І., Пак А. О., Пак А. В., Жеребкін М. В. Вплив параметрів руху сушильного агента на кінетику сушіння змішаним теплопідводом // Східно-європейський журнал передових технологій. 2014. № 2/12(68). С. 4–8. **Стаття у фаховому виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз.** *Внесок здобувача: розробка конструкції пристрою для дослідження впливу параметрів руху потоку повітря відносно обтюраторів під час застосування індукованого тепломасообміну для сушіння вологої сировини, участь в узагальненні висновків.*

26. Дюкарева Г. И., Пак А. О., Гасанова А. Э. Влияние эламина и стевиозида на поверхностное натяжение яичной массы // Товары і ринки.

2014. № 1(17). С. 89–97. *Внесок здобувача: розробка конструкції пристрою та методики дослідження поверхневого натягу харчових систем в залежності від вмісту системної води в них та доданої кількості еламіну та стевіозиду, участь в узагальненні висновків.*

27. Diukareva Galina, Pak Andrii, Gasanova Anna. Determination of storage conditions for new biscuits using their sorption isotherms // Ukrainian Food Journal. 2014. Vol. 3. Iss. 2. P. 249–256. **Стаття у фаховому виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз.** *Внесок здобувача: розробка алгоритму розрахунку активності води харчової сировини тензометричним методом, здійснення математичної обробки результатів експериментів, участь в узагальненні висновків.*

28. Погожих М. І., Чеканов М. А., Пак А. О. Концепція підвищення енергоефективності технологічних процесів харчових виробництв // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. пр. / Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. Х.: ХДУХТ, 2015. Вип. 1(21). С. 139–147. *Внесок здобувача: участь у розробці концепції підвищення енергоефективності процесів харчових виробництв, написання програм для обробки експериментальних даних.*

29. Погожих М. І., Синєкоп М. С., Торяник Д. О., Пак А. О. Наближений розв'язок задач теорії сушіння капілярно-пористих тіл складної форми // Science Rise. 2016. № 3/2(20). С. 6–11. **Стаття у виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз.** *Внесок здобувача: участь у постановці завдання дослідження, здійснення математичного моделювання кінетики вологовмісту та температури у капілярно-пористому тілі циліндричної форми за межових умов третього та першого роду під час застосування індукованого тепломасообміну для сушіння даної сировини, участь в узагальненні висновків.*

30. Погожих М. І., Синєкоп М. С., Пак А. О., Чеканов М. А. Сумісне використання R-функцій і проєкційного методу в задачах теорії сушіння // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного

господарства і торгівлі : зб. наук. пр. / Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. Х.: ХДУХТ, 2016. Вип. 1(23). С. 284–293. *Внесок здобувача: участь у постановці завдання дослідження, здійснення математичного моделювання кінетики вологовмісту та температури у капілярно-пористому тілі паралелепіпедної форми за межових умов третього та першого роду під час застосування індукованого тепломасообміну для сушіння даної сировини, участь в узагальненні висновків.*

31. Pogozhikh M., Pak A. The development of an artificial energotechnological process with the induced heat and mass transfer // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. № 1/8(85). P. 50–58. **Стаття у фаховому виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз.** *Внесок здобувача: участь у розробці феноменологічної гіпотези ефекту індукованого тепломасообміну, встановлення рівняння індукованого тепломасообміну на основі його балансних рівнянь.*

32. Погожих М. І., Пак А. О., Пак А. В., Жеребкін М. В. Аналіз процесу індукованого тепломасообміну методом фазового простору / Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. пр. / Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. Х.: ХДУХТ, 2017. Вип. 2(25). С. 284–293. **Стаття у фаховому виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз.** *Внесок здобувача: проведення теоретичного аналізу ефекту індукованого тепломасообміну методом фазового простору, встановлення принципів відмінностей процесу тепломасообміну в термостаті з енергією активації від тепломасообміну без енергії активації.*

33. Погожих М. І., Пак А. О., Пак А. В., Жеребкін М. В. Технічна реалізація апаратів з використанням процесу індукованого тепломасообміну // Science Rise. 2017. № 6(35). С. 29–33. **Стаття у виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз.** *Внесок здобувача: розробка концептуальних рішень конструкцій апаратів з індукованим тепломасообміном.*

34. Пак А. О., Сабадаш С. М., Павлюк И. Н. Определение дисперсного состава послеспиртовой зерновой барды // Вестник Алматинского технологического университета. Алматы: АТУ, 2015. Вып. 2. С. 43–47.

*Стаття у виданні Республіки Казахстан. Внесок здобувача: участь у постановці завдання дослідження, написання програм для розрахунку диференціальних та інтегральних функцій розподілення частинок післяспиртової зернової барди за розмірами.*

35. Установка для гидротермичной обработки та сушіння крупы: пат. на корисну модель № 48230, Україна, МПК А 23 L 3/00. // Черевко О. І., Погожих М. І., Жеребкін М. В., Пак А. О., Цуркан М. М.; № u200909646; заявл. 21.09.2009; опубл. 10.03.2010, Бюл. № 5. 2 с. *Внесок здобувача: участь у постановці задач та розробці концептуального рішення конструкції апарата.*

36. Спосіб дослідження динамічної поведінки вологи в капілярно-пористих колоїдних матеріалах методом ЕПР-спінових міток під час сушіння: пат. на корисну модель № 87562, Україна, МПК G 01 N 24/10. // Погожих М. І., Ромоданов І. С., Пак А. В., Пак А. О.; № u201310871; заявл. 10.09.2013; опубл. 10.02.2014, Бюл. № 3. 4 с. *Внесок здобувача: розробка програмного математичного забезпечення для аналізу спектрів ЕПР.*

37. Погожих М. І., Пак А. О., Толстова Я. В. Дослідження теплової дії на плодово-ягідну сировину під час ЗТП-сушіння зі штучним пороутворенням // Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини: Всеукр. наук.-практ. конф., 31 жовтня 2008 р.: тези доп. Х.: ХДУХТ, 2008. С. 11–12. *Внесок здобувача: розробка експериментальної установки для дослідження теплової дії на плодово-ягідну сировину під час сушіння, написання програм для розрахунку середньооб'ємної температури сировини за кінетикою температури.*

38. Перцевий Ф. В., Пак А. О., Теймурова А. Т. Исследование количества вымороженной влаги в агаровых студнях с использованием пищевой белковой добавки // Стратегічні напрямки розвитку підприємств



харчових виробництв, ресторанного господарства і торгівлі: Міжнар. наук.-практ. конф., присвячена 70-річчю з дня народження д-ра техн. наук, проф., чл.-кор. ВАСГНІЛ Беляєва М.І., 19 листопада 2008 р.: тези доп. Х.: ХДУХТ, 2008. С. 147–148. *Внесок здобувача: постановка експериментальних досліджень системної води агарових драглів низькотемпературним калориметричним методом, проведення вимірювань та участь в узагальненні висновків.*

39. Погожих М. І., Пак А. О., Толстова Я. В. Исследование гигроскопических свойств среды для культивирования бактерий методом Фурье-анализа ЭПР-спектров // Техника и технологии пищевых производств: VII-я Междунар. научн.-техн. конф., 21-22 мая 2009 г.: тезисы докл. Могилев: УО МГУП, 2009. С. 303. *Внесок здобувача: розробка алгоритму та написання програм для Фур'є-аналізу ЕПР-спектрів спіноміченої сировини, участь в узагальненні висновків.*

40. Погожих М. І., Пак А. О., Жеребкін М. В. Способ и установка для получения быстровосстанавливаемых каш с использованием принципов СТП-сушки // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов: Междунар. научн.-техн. семинар, 11-13 мая 2010 г.: сб. трудов. Воронеж: ГОУ ВПО «ВГЛТА», 2010. С. 220–223. *Внесок здобувача: участь у розробці способу та розробка концептуального рішення апарата для гідротермічної обробки круп..*

41. Погожих М. І., Пак А. О., Жеребкін М. В. Шляхи підвищення якості швидковідновлювальних продуктів харчування, які отримують з використанням сушіння змішаним теплопідводом // Strategy of Quality in Industry and education: VI International Conference, June 4-11 2010: proceedings. Varna, Bulgaria, 2010. Volume I (P. 1). P. 422–423. *Внесок здобувача: проведення аналізу потенціальних шляхів підвищення якості швидковідновлюваних каш, отримуваних з використанням індукованого тепломасообміну.*

42. Погожих М. І., Пак А. О. Постановка задачи исследования развития диссипативных структур при сушке смешанным теплоподводом // Современные энергосберегающие тепловые технологии (Сушка и термовлажностная обработка материалов): IV Междунар. научн.-практ. конф., 20-23 сентября 2011 г.: сб. трудов. Москва: ФГБОУ ВПО «МГАУ им. В.П. Горячкина», 2011. Т.1. С. 432–436. *Внесок здобувача: участь у обтрунтуванні вирішення теплової задачі для індукованого тепломасообміну для пояснення та описання його особливостей.*

43. Погожих М. І., Пак А. О., Жеребкін М. В. Дослідження кінетики сушіння сировини при виробництві швидковідновлюваних каш // Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини: Всеукр. наук.-практ. конф., 3-4 листопада 2011р.: тези доп. Х.: ХДУХТ, 2011. С. 62-63. *Внесок здобувача: розробка експериментальної установки для дослідження зміни вологовмісту та температури в процесі гідротермічної обробки сировини, участь в узагальненні висновків.*

44. Погожих М. І., Пак А. О., Жеребкін М. В. Визначення умов зберігання швидковідновлювальних каш, отриманих сушінням змішаним тепло підведенням // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі. Економічна стратегія і перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг: Міжнар. наук.-практ. конф., 19 травня 2011 р.: тези доп. у 4 ч. Х.: ХДУХТ, 2011. Ч.2. С. 85–86. *Внесок здобувача: участь у проведенні експериментальних досліджень тензометричним методом, виявлення змін гігроскопічних властивостей швидковідновлюваних каш під час зберігання.*

45. Пак А.О. Функція розподілення потужності дисипативних структур в сировині під час ЗТП-сушіння // Наукова періодика слов'янських країн в умовах глобалізації: Міжнар. наук. конф.: матеріали. Київ, 2012. Ч.1. Том. Промислові технології. С. 19–21.

46. Погожих М. І., Пак А. О., Жеребкін М. В. Дослідження стану вологи швидковідновлюваної каші методом ЕПР-спінових міток //

Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі. Економічна стратегія і перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг: Міжнар. наук.-практ. конф. присвячена 45-річчю ХДУХТ, 18 жовтня 2012 р.: тези доп. у 2 ч. Х.: ХДУХТ, 2012. Ч. 1. С. 425–427. *Внесок здобувача: розробка алгоритму та написання програм для аналізу форм зв'язку системної води швидковідновлюваних каш за їх ЕПР-спектрами.*

47. Пак А. О., Павлюк И. Н., Мольский А. С. Установка для исследования испарения влаги из зерновых // Пищевые инновации и биотехнологии: Междунар. научн. форум: тезисы докл. Кемерово: КемТИПП, 2013. С. 772–775. *Внесок здобувача: постановка завдання дослідження, розробка конструкційних особливостей пристрою для дослідження інтенсивності випарювання системної води зернових.*

48. Погожих М. І., Пак А. В., Пак А. О. Дослідження системної води модельних тіл із крохмалю тензометричним методом // Вода в харчових продуктах і для харчових продуктів : Всеукр. наук.-практ. конф., 16-17 травня 2013 р.: тези доп. Х.: ХДУХТ, 2013. С. 59-60. *Внесок здобувача: проведення математичної обробки результатів тензометричних досліджень модельних тіл із крохмалю, наведення кореляції отриманих експериментальних даних з даними, отриманими ЕПР-методом.*

49. Погожих М. І., Пак А. О., Чеканов М. А. Оцінювання ефективності використання енергії // Прогресивна техніка та технології харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі. Економічна стратегія і перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг: Міжнар. наук.-практ. конф. присв. 75-річчю з дня народж. ректору ун-ту (1988-1991 рр.), д-ра техн. наук, проф., чл.-кор. ВАСГНІЛ Беляєва М. І., 19 листопада 2013 р.: тези доп. у 2 ч. Х.: ХДУХТ, 2013. Ч. 1. С. 424–425. *Внесок здобувача: участь у розробці концепції підвищення енергоефективності процесів харчових виробництв та узагальненні висновків.*

50. Погожих М. І., Пак А. О. Розвиток наукових основ ефективного керування технікою та технологією ЗТП-сушіння харчової сировини // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність: Міжнар. наук.-практ. конф., 22 травня 2014 р.: тези доп. у 2-х ч. Х.: ХДУХТ, 2014. Ч. 1. С. 3-4. *Внесок здобувача: участь у постановці завдання дослідження та у проведенні аналізу потенційних можливостей керування енергоефективністю індукованим тепломасообміном під час його застосування для сушіння харчової сировини.*

51. Погожих М. І., Пак А. В., Пак А. О. Потенційні можливості штучного керування процесом сушіння вологої сировини // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність: Міжнар. наук.-практ. конф., 14 травня 2015 р.: тези доп. у 2-х ч. Х.: ХДУХТ, 2015. Ч. 1. С. 300–301. *Внесок здобувача: виявлення чинників для керування енергоефективністю індукованим тепломасообміном під час його застосування для сушіння харчової сировини.*

52. Погожих М. І., Синєкоп М. С., Пак А. О. Використання числових методів для дослідження математичних моделей сушіння // Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини: Всеукр. наук.-практ. конф. до 25-річчя факультету обл. та техн. сервісу ХДУХТ, 29 жовтня 2015 р.: тези доп. Х.: ХДУХТ, 2015. С. 13–14. *Внесок здобувача: побудування розподілення полів температур за різних моментів часу в термостаті циліндричної форми, отриманого за розв'язком задачі про розподіл температури з використанням методу R-функцій, участь в узагальненні висновків.*

53. Погожих М. І., Синєкоп М. С., Пак А. О. Структура розв'язання задач теорії сушіння капілярно-пористих тіл складної форми // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність: Міжнар. наук.-практ. конф., 19 травня

2016 р.: тези доп. у 2-х ч. Х.: ХДУХТ, 2016. Ч. 1. С. 369–370. *Внесок здобувача: побудування розподілення полів температур за різних моментів часу в термостаті паралелепіпедної форми, отриманого за розв'язком задачі про розподіл температури з використанням методу R-функцій, участь в узагальненні висновків.*

54. Погожих М. І., Пак А. О., Жеребкін М. В. Дослідження характеру процесу ІнтМО за наявності розривів ККПТ всередині термостату // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність: Міжнар. наук.-практ. конф., присв. 50-річчю заснування ХДУХТ, 18 травня 2017 р.: тези доп. у 2-х ч. Х.: ХДУХТ, 2017. Ч. 1. С. 316–317. *Внесок здобувача: постановка завдання дослідження, розробка способів реалізації розривів колоїдного капілярно-пористого тіла в термостаті, участь в узагальненні висновків.*

55. Погожих М. І., Пак А. О., Жеребкін М. В., Рурак Л. В. Фазовий портрет процесу індукованого тепломасообміну // Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини: Всеукр. наук.-практ. конф. присв. 50-річчю ХДУХТ, 1-2 червня 2017 р.: тези доп. Х.: ХДУХТ, 2017. С. 43-44. *Внесок здобувача: проведення теоретичного аналізу ефекту індукованого тепломасообміну методом фазового простору, узагальнення висновків.*

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	37
ВСТУП	38
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕОРІЇ ТА ТЕХНІКИ ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛО- ТА МАСООБМІНУ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ	46
1.1 Обґрунтування поняття індукованих процесів	46
1.1.1 Способи організації процесів тепло- та масообміну під час випарювання та концентрування	48
1.1.2 Способи організації процесів тепло- та масообміну під час перегонки та ректифікації	52
1.1.3 Способи організації процесів тепло- та масообміну під час сушіння	54
1.2 Основи процесу тепломасообміну під час сушіння змішаним теплопідводом вологого колоїдного капілярно-пористого тіла	61
1.2.1 Теоретичні основи процесу тепломасообміну під час сушіння змішаним теплопідводом вологого капілярно пористого колоїдного тіла	61
1.2.2 Технічна реалізація процесу тепломасообміну під час сушіння змішаним теплопідводом вологого колоїдного капілярно-пористого тіла	64
1.2.3 Загальна характеристика кривих кінетики процесу сушіння змішаним теплопідводом	66
1.2.4 Диференціальне рівняння переносу маси під час сушіння змішаним теплопідводом	69
1.3 Особливості протікання процесу сушіння змішаним теплопідводом	73
Висновки до розділу 1	76

РОЗДІЛ 2. ГІПОТЕЗА ЕФЕКТУ ІНДУКОВАНОГО ТЕПЛОМАСООБМІНУ, МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МАТЕМАТИЧНА ОБРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ	78
2.1 Феноменологічна гіпотеза ефекту індукованого тепломасообміну	78
2.1.1 Суть феномена ефекту індукованого тепломасообміну, необхідні та достатні умови для його спостереження	78
2.1.2 Балансні рівняння ефекту індукованого тепломасообміну для випадку флуктуації концентрації частинок рідини в обтюраторі	84
2.2 Об'єкт і предмет дослідження	92
2.3 Технічне забезпечення досліджень	96
2.4 Методики дослідження	103
2.4.1 Методики дослідження індукованого тепломасообміну: кінетика вологовмісту, кінетика температури	103
2.4.2 Методика дослідження стану вологи в колоїдному капілярно-пористому тілі методом ЕПР-спінових міток	104
2.5. Математична обробка результатів експериментів	111
Висновки до розділу 2	114
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТУ ІНДУКОВАНОГО ТЕПЛОМАСООБМІНУ	117
3.1 Аналіз процесу тепломасообміну в термостаті методом фазового простору	117
3.2 Системна вода харчової сировини та продуктів	130
3.2.1 Обґрунтування визначення «системна вода»	130
3.2.2 Дослідження системної води харчових систем низькотемпературним калориметричним методом	138

3.2.3 Дослідження системної води харчових систем тензометричним методом	146
3.2.4 Дослідження системної води крохмальутримуючих харчових систем методом ЕПР-спінових міток	149
3.3 Розвинення фізико-математичної моделі ефекту індукованого тепломасообміну	157
3.3.1 Дослідження характеру ефекту індукованого тепломасообміну за температури термостата більшої за температуру кипіння рідини	159
3.3.2 Дослідження характеру ефекту індукованого тепломасообміну за наявності твердої, рідкої та газової фаз всередині термостата з розривами між фазами	166
3.3.3 Дослідження характеру ефекту індукованого тепломасообміну для сировини з газонепроникними включеннями	174
3.3.4 Кінетика температури колоїдного капілярно-пористого тіла під час індукованого теплообміну як функція температури термостата	182
3.3.5 Кінетика температури колоїдного капілярно-пористого тіла у термостаті під час індукованого теплообміну як функція координат	184
3.3.6 Кінетика вологовмісту колоїдного капілярно-пористого тіла під час індукованого теплообміну як функція температури термостата та відстані від його внутрішньої стінки	190
3.3.7 Фазові траєкторії системи під час ефекту індукованого тепломасообміну за різних температур термостата та координати	195



3.3.8 Вплив швидкості потоку повітря, що рухається відносно обтюратора термостата, на характер індукованого тепломасообміну	201
3.3.9 Вплив на характер ефекту індукованого тепломасообміну кута обдування обтюраторів потоком повітря	218
3.3.10 Вплив на характер ефекту індукованого тепломасообміну розмірів внутрішнього виділеного об'єму термостата	225
Висновки до розділу 3	228
<b>РОЗДІЛ 4. ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТУ ІНДУКОВАНОГО ТЕПЛОМАСООБМІНУ</b>	<b>233</b>
4.1 Наближене розв'язання задач теорії тепломасообміну з використанням методу R-функцій	233
4.1.1 Розв'язок задачі про розподіл температури і вологовмісту у внутрішньому виділеному об'ємі термостата циліндричної форми, що містить три фази	234
4.1.2 Розв'язок задачі про розподіл температури та вологовмісту у внутрішньому виділеному об'ємі термостата паралелепіпедної форми, що містить три фази	246
4.2 Математична модель розвитку потужності дисипативних структур під час індукованого тепломасообміну	258
4.2.1 Постановка задачі зі знаходження функції розподілення потужності дисипативних структур з використанням рівняння теплопровідності	258
4.2.2 Теплопровідність, теплоємність та густина колоїдного капілярно-пористого тіла всередині термостата як функції температури термостата та координати	260
4.2.3 Функція розвитку потужності дисипативних структур в колоїдному капілярно-пористому тілі всередині термостата під час індукованого тепломасообміну	265

	34
Висновки до розділу 4	270
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ АПАРАТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНДУКОВАНОГО ТЕПЛОМАСООБМІНУ	272
5.1 Концептуальні рішення технічної реалізації апаратів з використанням індукovanого тепломасообміну	274
5.2 Розробка обладнання для виробництва швидковідновлюваних каш з використанням ефекту індукovanого тепломасообміну	288
5.2.1 Принципова технологічна схема виробництва швидковідновлюваних каш з використанням ефекту індукovanого тепломасообміну	289
5.2.2 Технічна реалізація операцій проварювання та сушіння вологої сировини в термостаті з використанням індукovanого тепломасообміну	292
5.2.3 Раціональні режими отримання швидковідновлюваних каш з використанням ефекту індукovanого тепломасообміну	296
5.2.4 Розрахунок апарата для гідротермічної обробки крупи з використанням ефекту індукovanого тепломасообміну та його впровадження у виробництво	307
5.2.5 Економічний ефект від впровадження у виробництво апарата для гідротермічної обробки круп з використанням ефекту індукovanого тепломасообміну	320
Висновки до розділу 5	324
РОЗДІЛ 6. ФУНКЦІОНАЛЬНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ, ОТРИМАНОЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНДУКОВАНОГО ТЕПЛОМАСООБМІНУ	326
6.1 Функціонально-технологічні властивості та показники якості швидковідновлюваних каш, отриманих з використанням індукovanого тепломасообміну	327

6.1.1 Гігроскопічні властивості швидковідновлюваних каш, отриманих в термостаті з використанням ефекту індукованого тепломасообміну	327
6.1.2 Відновлюваність швидковідновлюваних каш	336
6.1.3 Мікробіологічні показники та вміст токсичних елементів і радіонуклідів швидковідновлюваних каш, отриманих в з використанням індукованого тепломасообміну	339
6.2. Колірні характеристики, вміст вітаміну С та мікробіологічні показники сушеної чорниці, отриманої в термостаті з використанням ефекту індукованого тепломасообміну	342
6.3 Спектрофотометричні дослідження концентрату соку чорниці, отриманого випарюванням в термостаті з використанням індукованого тепломасообміну	350
6.4 Впровадження та апробація результатів науково-дослідної роботи	353
Висновки до розділу 6	356
ВИСНОВКИ	358
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	362
ДОДАТКИ	404
ДОДАТОК А. Деклараційні патенти України на корисну модель	405
А.1. №87562 «Спосіб дослідження динамічної поведінки вологи в капілярно-пористих колоїдних матеріалах методом ЕПР-спінових міток під час сушіння»	406
А.2. №48230 «Установка для гідротермічної обробки та сушіння крупи»	412
ДОДАТОК Б. Приклади розрахунку за допомогою пакету програм MathCad	417
Б.1. Приклади програм для розрахунку деяких функцій для математичної моделі розвитку дисипативних структур під час	418

ІнТМО	
Б.2. Розрахунок основних технічних характеристик установки малої продуктивності для гідротермічної обробки круп з використанням ІнТМО	429
Б.3. Програми для колориметричних розрахунків	435
ДОДАТОК В. Фотографії плину вологої сировини в трубі прямокутного перерізу	441
ДОДАТОК Г. Проект ТУ У 15.8-01566330-276:2012 «Каші швидковідновлювані»	445
ДОДАТОК Д. Акти впровадження результатів наукових досліджень у виробництво	465
Д.1. Акт випуску дослідних партій швидковідновлюваних каш на ТОВ «Терра» (м. Первомайський, Харківська обл.)	466
Д.2. Акт випуску дослідних партій швидковідновлюваних каш на ТОВ «Спільне україно-німецьке підприємство «Злаки» (м. Полтава)	468
Д.3. Акт впровадження рекомендацій з підвищення енергоефективності переробки сільськогосподарської продукції на ПСП ім. Т.Г. Шевченка (с. В. Івани, Богодухівський р-н, Харківська обл.)	470
Д.4. Акт впровадження рекомендації, щодо раціональних режимів гідротермічної обробки та сушіння сировини рослинного походження на ПСП ім. Т.Г. Шевченка (с. В. Івани, Богодухівський р-н, Харківська обл.)	472
Додаток Е. Акти про впровадження результатів наукових досліджень у навчальний процес ХДУХТ	475
Е.1. Акт від 06.04.2012 р.	476
Е.2. Акт від 25.05.2015 р.	478
Е.3. Акт від 17.05.2017 р.	480

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

ЕПР – електронний парамагнітний резонанс;

ІнТМО – індукований тепломасообмін;

ЗТП – змішаний теплопідвод;

ККПТ – колоїдне капілярно-пористе тіло;

КПТ – капілярно-пористе тіло;

КТ – колоїдне тіло;

НВЧ – надвисока частота;

ТМО – тепломасообмін;

ФС – функціональна ємність.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** На сучасному етапі розвитку галузей промисловості країн світу існує необхідність пошуку наукового обґрунтування рішень проблем ефективного використання енергетичних ресурсів за умови забезпечення вимог до екологічності виробництв. Особливий інтерес із цієї точки зору становлять процеси тепло- та масообміну (ТМО), які широко застосовуються в харчовій і переробній промисловості. Завдяки значному внеску в розвиток теорії ТМО таких класичних вчених, як О.В. Ликов, А.С. Гінзбург, М.О. Гришин, Г.К. Філоненко та сучасних вітчизняних і зарубіжних науковців, таких як А.А. Долинський, Ю.Ф. Снежкін, А.А. Халатов, Б.І. Басок, К.Д. Малецька, Ж.О. Петрова, Г.М. Станкевич, М.І. Погожих, В.О. Потапов, О.Г. Бурдо, А.М. Поперечний, В.М. Атаманюк, О.О. Завалій, В.В. Шутюк, С.П. Рудобашта, В.Ф. Сорочинський, О.І. Расев та ін., існує можливість знаходити нові шляхи в напрямі інтенсифікації цих процесів, зменшення питомих енерговитрат, удосконалення обладнання та підвищення якості кінцевої продукції. При цьому перспективним є пошук таких комбінацій потенціалів перенесення, за яких процеси перенесення не протікають самовільно, а лише за умови їх індукування. Для таких індукованих процесів один або декілька параметрів системи не мають «спорідненості» з навколишнім середовищем і прийняти рівноважне значення можуть тільки за умови подолання деякого енергетичного активаційного бар'єра. Апарати, створені на використанні таких процесів, як правило, характеризуються високою енергоефективністю та екологічністю. Таким чином, пошук і розробка теоретичних основ нових індукованих процесів та практична реалізація апаратів із їх використанням є досить пріоритетними напрямками всесвітньої політики та політики України у сфері енергоефективності.

Одним із таких індукованих процесів є процес, в основі якого лежить ефект індукованого тепломасообміну (ІнТМО). До сьогодні ефект ІнТМО

отримав теоретичний розвиток лише в межах реалізації процесу сушіння харчової сировини (сушіння змішаним теплопідводом (ЗТП-сушіння)). Однак залишається недостатньо повно описаним фізичний механізм низки особливостей протікання ефекту ІнТМО, пояснити які, виходячи з теоретичних основ, наведених у роботах з його дослідження, неможливо. Розвинення теоретичних основ ефекту ІнТМО обумовлюють актуальність дослідження, яка полягає у виявленні потенціалу його використання в різних технологіях і техніці та в ефективному керуванні витратами енергії з отриманням продукції із заданими властивостями.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалася відповідно до тематичних планів наукових досліджень кафедри фізико-математичних та інженерно-технічних дисциплін ХДУХТ у межах держбюджетної теми № 2-11 ФБ «Дослідження стану та структури вологи в харчових продуктах методами ЯМР та ЕПР-спектроскопії» (0108U001333), бюджетних тем № 06-11-13 Б «Наукові обґрунтування енергоефективних процесів харчової промисловості» (0110U006618) та № 13-14-16 Б «Удосконалення фізичних методів аналізу технологій та процесів харчових виробництв» (0113U008396), госпдоговірних тем № 31-14-15 Д «Аналіз енергоефективності механічних та теплових процесів під час переробки сільськогосподарської сировини» (0114U005577) та № 10-16-17 Д «Розробка раціональних режимів гідротермічної обробки рослинної сировини способом з використанням індукованого тепломасообміну» (0116U008874).

**Мета та завдання дослідження.** Метою роботи є розробка наукових основ індукованого тепломасообміну та його використання в процесах та обладнанні харчових виробництв.

Виходячи із мети, сформульовані основні завдання дослідження:

– розробити гіпотезу ефекту ІнТМО, обґрунтувати необхідні та достатні вимоги для його спостереження;

– проаналізувати особливості ефекту ІнтМО методом фазового простору, довести розроблену гіпотезу експериментальними дослідженнями за різних керуючих параметрів та параметрів порядку;

– дослідити та проаналізувати вплив на характер протікання ІнтМО властивостей рідин переходити в газовий стан;

– установити особливості протікання ІнтМО за різної температури термостата;

– вивчити вплив способу та ступеня заповнення виділеного внутрішнього об'єму термостата на продуктивність видалення рідини з нього під час ІнтМО;

– дослідити вплив на інтенсивність ІнтМО параметрів потоку повітря, що рухається відносно обтюратора термостата;

– розробити та проаналізувати фізико-математичні моделі для керування процесом тепломасообміну під час ІнтМО шляхом варіювання керуючими параметрами та параметрами порядку;

– розробити концептуальні рішення технічної реалізації апаратів для харчової промисловості з використанням ІнтМО та вимоги до апаратного забезпечення практичного впровадження отриманих результатів на прикладі концептуального рішення; провести впровадження результатів дослідження у виробництво та навчальний процес;

– дослідити функціонально-технологічні властивості та показники якості харчової продукції, що отримується в апаратах із ІнтМО.

*Об'єкт дослідження* – процеси тепло- та масообміну під час виробництва харчових продуктів.

*Предмет дослідження* – харчова сировина рослинного та тваринного походження, кінетичні та динамічні характеристики ІнтМО, системна вода харчової сировини, фізико-математичні моделі процесів тепло- та масообміну під час ІнтМО, конструкції та вузли обладнання.

*Методи дослідження* – теоретичні методи дослідження нерівноважної термодинаміки та синергетики, методи дослідження стану та структури води,



методи дослідження фізико-хімічних, функціонально-технологічних, структурно-механічних, мікробіологічних, органолептичних показників, методи системного аналізу, планування експерименту і математичної обробки експериментальних даних із використанням прикладних комп'ютерних програм.

**Наукова новизна одержаних результатів.** У роботі вперше:

– розкрито сутність ефекту ІнТМО, який спостерігається в термостаті з обтюратором та полягає в переході системи від нестійкої рівноваги до стійкої, який супроводжується розсіюванням теплоти за рахунок переходу рідкої фази всередині термостата в газовий стан та видалення її через обтюратор у довкілля;

– визначено основне рівняння ефекту ІнТМО, за яким потік маси рідини, що виноситься з термостата в газовому стані, індукує тепловий потік, який розсіюється всередині термостата, при цьому коефіцієнт пропорційності між потоками обумовлюється фізичними властивостями рідини, способом заповнення внутрішнього об'єму термостата і конструкцією обтюратора;

– доведено, що система «навколишнє середовище – внутрішнє середовище термостата» є проточною динамічною системою по відношенню до теплової енергії та маси, у якій відбуваються процеси самоорганізації, що обумовлює ефективне розсіювання теплової енергії за рахунок фазових переходів I роду;

– уведено поняття «системна вода» як рідка фаза, що знаходиться в об'ємі харчової системи всередині термостата впродовж часу, не меншого за характерний час технологічної операції, та яка визначає перебіг ТМО і функціонально-технологічні властивості цієї харчової системи;

– визначено необхідні та достатні умови для спостереження і регулювання ефекту ІнТМО; при цьому наявність суцільності газового середовища за парціальним тиском пари рідини всередині термостата є основним параметром порядку, без якого ефект ІнТМО неможливий;

– встановлено: робота потоку повітря, що рухається відносно обтюратора, є керуючим параметром системи «навколишнє середовище – внутрішнє середовище термостата», за допомогою якого організовується «запуск» ІнтМО; при цьому визначено, що основна функція потоку повітря – викликати флуктуації параметрів газового середовища в об’ємі обтюратора;

– визначена неможливість досягнення рідиною у внутрішньому об’ємі термостата температури кипіння за умови протікання ІнтМО за температур термостата, що перевищують критичні;

– обґрунтовано фізико-математичне моделювання ефекту ІнтМО як розв’язання теплової задачі; при цьому масообмін ураховано через функцію розвитку потужності дисипативних структур, яка описує розсіяння теплової енергії на фазовий перехід рідини в газовий стан;

– розроблено математичну модель розвитку потужності дисипативних структур під час ІнтМО, експериментально доведено коректність її використання для врахування особливостей ІнтМО під час інженерних розрахунків апаратів з його застосуванням.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблено концептуальні рішення конструкцій нових універсальних апаратів з ІнтМО для виконання наступних технологічних операцій харчової промисловості: сушіння; гідротермічної обробки; випарювання, згущення сировини з високим вмістом системної води; ректифікації, перегонки, дистиляції розчинів, суспензій; охолодження, термостатування.

На основі концептуальних рішень апаратів з ІнтМО розроблено спосіб та апарат безперервної дії для гідротермічної обробки круп з ІнтМО, де кінцевою продукцією є швидковідновлювані каші. Із використанням емпіричних і стандартних рівнянь теплового й масового балансів з урахуванням особливостей ІнтМО розраховано основні характеристики розробленого апарата для гідротермічної обробки, якими доведено, що економічний ефект розробки досягається за рахунок скорочення кількості технологічних операцій, що використовуються, виконання основних

операцій в одному апараті та за рахунок скорочення енерговитрат на одиницю продукції більш ніж у 1,3 разу порівняно зі способами, що існують. На технічне рішення, запропоноване в дисертаційній роботі, отримано 2 патенти України на корисну модель. Розроблено проект ТУ У 15.8-01566330-276:2012 «Каші швидковідновлювані».

Результати роботи впроваджено на ТОВ «Терра» (м. Первомайський, Харківська обл., акт від 13.02.2011 р.), ТОВ «Спільне українсько-німецьке підприємство «Злаки» (м. Полтава, акт від 13.09.2011 р.), ПСП ім. Т.Г. Шевченка (м. Богодухів, акти від 25.02.2015 р., 27.06.2017 р.) та в навчальний процес ХДУХТ (акти від 06.04.2012 р., 25.05.2015 р., 17.05.2017 р.).

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати теоретичних і експериментальних досліджень отримані самостійно. Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні наукової гіпотези, наукової концепції та доведенні наукових положень дисертації. Автор брав безпосередню участь у розробці методик, проведенні комплексних досліджень процесу й узагальненні експериментальних результатів, проведенні заходів з практичного упровадження результатів наукових досліджень, формулюванні висновків та підготовці до публікації результатів досліджень.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та були схвалені на: Всеукраїнській науково-практичній конференції «Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини» (м. Харків, 2008 р.); Міжнародній науково-практичній конференції, присвяченій 70-річчю з Дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ Беляєва М.І. «Стратегічні напрями розвитку підприємств харчових виробництв, ресторанного господарства і торгівлі» (м. Харків, 2008 р.); VII Міжнародній науково-технічній конференції «Техніка та технології харчових виробництв» (м. Могилів, 2009 р.); Міжнародному науково-технічному семінарі «Актуальні проблеми сушіння та термовологісної обробки матеріалів» (м. Вороніж, 2010 р.); VI Міжнародній конференції «Strategy of Quality in

Industry and Education» (м. Варна, 2010 р.); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні енергозберігаючі технології (СЕТТ-2011)» (м. Москва, 2011 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини» (м. Харків, 2011 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі. Економічна стратегія і перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг» (м. Харків, 2011–2013 рр.); Міжнародній науковій конференції «Наукова періодика слов'янських країн в умовах глобалізації» (м. Київ, 2012 р.); Міжнародному науковому форумі «Харчові інновації та біотехнології» (м. Кемерово, 2013 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Вода в харчових продуктах і для харчових продуктів» (м. Харків, 2013 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність» (м. Харків, 2014–2016 рр.); Всеукраїнській науково-практичній конференції до 25-річчя факультету обладнання та технічного сервісу ХДУХТ «Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини» (м. Харків, 2015 р.); Міжнародній науково-практичній конференції, присвяченій 50-річчю заснування Харківського державного університету харчування та торгівлі «Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність» (м. Харків, 2017 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції, присвяченій 50-річчю заснування Харківського державного університету харчування та торгівлі «Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини» (м. Харків, 2017 р.).

**Публікації.** Матеріали дисертаційної роботи опубліковані в 55 наукових працях, серед яких: 3 монографії; 31 стаття, серед яких 27 – у наукових фахових виданнях України (з них 5 – у виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз), 1 – у науковому періодичному виданні

іншої держави з наряду, із якого підготовлено дисертацію, та 3 статті у виданнях України, що включені до міжнародних наукометричних баз; 2 патенти України на корисну модель; 19 матеріалів конференцій, семінарів та тез доповідей.

**Обсяг і структура дисертаційної роботи.** Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел з 327 найменувань (у тому числі 61 іноземне) та 14 додатків. Основний зміст роботи викладено на 323 сторінках, вона містить 21 таблицю і 105 рисунків.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕОРІЇ ТА ТЕХНІКИ ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛО- ТА МАСООБМІНУ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

### 1.1 Обґрунтування поняття індукованих процесів

Інтенсивний розвиток галузей промисловості, індустріалізація країн світу призвели до необхідності пошуку наукового обґрунтування рішень проблем ефективного використання енергетичних ресурсів при дотриманні зростаючих вимог до екологічності виробництв. Усередині проблеми варто виділити технологічні процеси [1, 2], тобто такі штучні дії людини, які, через певні послідовності законів природи, приводять до кінцевого продукту за рахунок використання й (або) перетворення одних видів енергії в інші (I початок термодинаміки) [3]:

$$\delta Q = dU + \delta A, \quad (1.1)$$

де  $Q$  – теплота, Дж;

$U$  – внутрішня енергія, Дж;

$A$  – робота, Дж.

Але використання підходу тільки з погляду закону збереження й перетворення енергії (1.1) недостатньо, оскільки він не «визначає» напрямку перерозподілу енергії, маси, зарядів, а лише встановлює баланс. За спрямованість же процесів, для встановлення цього балансу, відповідає II початок термодинаміки – закон зростання ентропії [4]:

$$dS > 0, \quad (1.2)$$

де  $S$  – ентропія, Дж/К.

Тоді, якщо розглядати енергетичний баланс усередині ізольованої системи, то цей баланс може бути стійким, якщо виконується (1.2): виробництво ентропії прагне до нуля, а потенціальна (вільна) енергія  $E_n$  прагне до мінімального значення [5]:

$$\frac{dS}{d\tau} \rightarrow 0; E_n \rightarrow \min. \quad (1.3)$$

Можна вважати, що умови (1.1-1.3), а також закони збереження маси, заряду – є обмежувальною областю застосування знань людини для рішення поставленої проблеми [6].

Необхідно відзначити, що будь-які перетворення теплоти, є необоротними, тобто призводять до зростання ентропії (безладу). Саме цей факт в основному й визначає ефективність технологічних процесів, де протікають фазові переходи речовини I роду [7].

При цьому перспективним є пошук таких комбінацій потенціалів перенесення, за яких процеси перенесення не протікають самовільно, а тільки за умови їх індукування. Для таких індукованих технологічних процесів початок процесу в природних умовах не відповідає виразу (1.3), наприклад, технології вирощування кристалів [8], напівпровідники [9, 10], лазери, каталітичні реакції й т.ін. Для цих випадків загальним є те, що хоча б один або декілька параметрів або властивостей системи не мають «спорідненості» з навколишнім середовищем і прийняти рівноважне значення можуть тільки, при подоланні деякого енергетичного активаційного бар'єра –  $E_A$ . Такі процеси, як правило, характеризуються високою енергоефективністю і екологічністю [11]. Таким чином, пошук і розробка теоретичних основ індукованих технологічних процесів є актуальним завданням в рамках всесвітньої політики та політики України в сфері енергоефективності [12].

Особливий інтерес, у цьому плані, представляють процеси тепло- та масообміну, які широко застосовуються у харчовій та переробній

промисловості [13, 14]. Розглянемо способи організації процесів тепло- та масообміну для виконання наступних технологічних операцій, які застосовуються у харчовій промисловості: сушіння, випарювання та концентрування, перегонка та ректифікація.

### 1.1.1 Способи організації процесів тепло- та масообміну під час випарювання та концентрування

Випарювання широко застосовують у цукровому, кондитерському, консервному, молочному та інших виробництвах для концентрування цукрових та вітамінних сиропів, плодових і овочевих соків, фруктово-ягідних начинок, молока, вершків та ін. [15-18]

Випарювання це процес ТМО, результатом якого є концентрування розчинів твердих нелетких або малолетких речовин шляхом випаровування летючого розчинника і відведення пари, що утворилась [19]. Зазвичай в якості теплоносія під час випарювання використовують водяну пару, яку називають первинною. Пара, що утворюється при випаровуванні розчину, що кипить, називається вторинною.

Рівняння масового балансу під час випарювання засноване на умові сталості маси сухих речовин розчину, що підлягає обробці, та має вигляд [19]:

$$G_1 C_1 = G_2 C_2 = (G_1 - W) \cdot C_2, \quad (1.4)$$

де  $G_1, G_2$  – відповідно кількість вихідної і згущеної сировини, кг;

$C_1, C_2$  – відповідно концентрація сухих речовин у вихідній і згущеній сировині, %;

$W$  – кількість випареної води, кг.



Рівняння теплового балансу випарювання за умови, що процес є стаціонарним та теплові втрати відсутні, являє рівність підведеної та відведеної теплоти:

$$DH_1 + G_1c_1t_1 = W_2H_2 + (G_1 - W)t_2c_2 + D_3c_3t_3, \quad (1.5)$$

де  $D, D_3$  – кількість первинної пари та конденсату, кг;

$H_1, H_2$  – ентальпія первинної пари та вторинної, Дж/кг;

$c_1, c_2, c_3$  – питома теплоємність, відповідно, вихідної і згущеної сировини та конденсату,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ;

$W_2$  – кількість вторинної пари, кг;

$t_1, t_2, t_3$  – відповідно температури: початкова вихідної сировини, кипіння, конденсата, К.

При цьому характеристикою ефективності роботи випарних апаратів є теплове навантаження та інтенсивність процесу випарювання. Тепловим навантаженням випарювання є відношення кількості теплоти, що вноситься з паром, до поверхні теплообміну та тривалості процесу:

$$q = \frac{Q}{S \cdot \tau} = \frac{D(H_1 - c_3t_3)}{S \cdot \tau}, \quad (1.6)$$

де  $q$  – теплове навантаження випарювання,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ ;

$Q$  – кількість теплоти, що вноситься, Дж;

$S$  – поверхня теплообміну,  $\text{м}^2$ ;

$\tau$  – тривалість процесу випарювання, с.

Інтенсивність процесу випарювання визначається за формулою:

$$I = \frac{W}{S \cdot \tau}, \quad (1.7)$$

де  $I$  – інтенсивність процесу випарювання,  $\frac{\text{кг вип. вологи}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$ .

Аналізуючи вирази (1.4) – (1.7), очевидним є те, що ефективність процесу випарювання обумовлюється ефективністю підведення теплоти ( $q$ ,  $D \cdot H_1$ ), площею теплообміну ( $S$ ), варіюванням температурою кипіння ( $t_2$ ) розчину, що підлягає обробці, та ефективністю використання вторинної пари ( $W_2 H_2$ ) і теплоти конденсату ( $D_3 c_3 t_3$ ) [20-22].

У промислових умовах [23-27] випарювання проводять під вакуумом, за підвищеного й атмосферного тиску. Вибір тиску пов'язаний з властивостями розчину, що підлягає випарюванню, і можливістю використання теплоти вторинної пари.

Випарювання під вакуумом має певні переваги перед випарюванням за атмосферного тиску. В апараті створюється вакуум шляхом конденсації вторинної пари в конденсаторі та відсмоктування з нього газу вакуум-насосом. Випарювання під вакуумом дозволяє збільшити інтенсивність процесу та знизити температуру кипіння харчового розчину, що важливо в разі концентрування розчинів речовин, схильних до розкладання при підвищених температурах. Застосування вакууму дозволяє збільшити рушійну силу теплопередачі, а отже, зменшити площу поверхні випарних апаратів. У разі однакової корисної різниці температур при випаровуванні під вакуумом можна використовувати теплоносій нижчих робочих параметрів (температура і тиск). Застосування вакууму дає можливість використовувати в якості теплоносія, що гріє, крім первинної пари, вторинний пар самої випарної установки, що знижує витрату первинної пари на нагрівання.

Під час випарювання за атмосферного тиску утворена вторинна пара скидається в атмосферу. Такий спосіб випарювання є найбільш простим, але найменш економічним.

Під час випарювання за підвищеного тиску вторинна пара може бути використана як нагрівальний агент у підігрівачах і т. ін. За даного способу випарювання використовують вторинну пару, як для випарювання, так і для інших потреб, тим самим підвищуючи енергоефективність процесу. Відбір вторинної пари під час випарювання за надлишкового тиску дозволяє використовувати теплоту більш раціонально, ніж під час випарювання під вакуумом. Однак випарювання за надлишкового тиску пов'язане з підвищенням температури кипіння розчину, тому даний спосіб застосовується лише для випарювання термічно стійких речовин.

Випарювання за атмосферного тиску, а іноді і випарювання під вакуумом, проводять в однокорпусних випарних апаратах, які застосовуються для концентрування порівняно невеликих кількостей розчину, коли збереження теплоти не має суттєвого значення. Однак найбільш поширені багатокорпусні випарні установки, що складаються з декількох випарних апаратів, або корпусів, в яких вторинна пара кожного попереднього корпусу направляється в якості нагрівального агента в наступний корпус. При цьому тиск в послідовно з'єднаних (по ходу розчину, що випарюється) корпусах знижується таким чином, щоб забезпечити різницю температур між вторинною парою з попереднього корпусу і розчином, що випарюється в даному корпусі, тобто створити необхідну рушійну силу процесу випарювання. У цих установках первинною парою обігривається тільки перший корпус, наступні обігриваються вторинною, чим досягається ефективність обладнання.

Таким чином, інтенсифікація ТМО процесів під час випарювання досягається, як правило, за рахунок зниження температури кипіння, шляхом зниження тиску у апараті, а енергетична ефективність – за рахунок раціонального використання вторинної теплоти.

### 1.1.2 Способи організації процесів тепло- та масообміну під час перегонки та ректифікації

Перегонка та ректифікація – найбільш поширені методи розділення рідких однорідних сумішей, що складаються з двох або декількох летючих компонентів [28-30].

Процеси перегонки та ректифікації широко використовуються в харчовій промисловості для отримання технічного та харчового етилового спирту, у виробництві ароматичних речовин і т. ін. [31].

Перегонка являє процес однократного часткового випаровування рідкої суміші та конденсації пари, що утворюється. Ректифікація – процес розділення багатокомпонентних гомогенних сумішей летючих рідин шляхом багатократного випаровування та конденсації [28, 29].

Дані ТМО процеси засновані на різницях температур кипіння, парціальних тисків та летючості окремих компонентів, які входять до складу суміші. Компонент суміші, що має більшу летючість, називається легколетючим, а компонент, що має меншу летючість – важколетючим. Відповідно легколетючий компонент кипить за нижчої температури, ніж важколетючий. В результаті перегонки або ректифікації вихідна суміш розділяється на дистилят, збагачений легколетючим компонентом, і залишок, збагачений важколетючим компонентом.

Конструкція обладнання для реалізації тепло- та масообміну в даних процесах (перегонка, ректифікація, виробництво ароматичних речовин) визначається метою технологічної обробки сировини [32].

Схема апарата для перегонки (дистиляції) наведена на рис. 1.1. Основними вузлами апарата для перегонки є ємність для суміші (перегінний куб), в якій вона нагрівається до кипіння, та конденсатор, до якого надходить пара легколетючого компонента та з якого відводиться готовий дистилят [28-31].

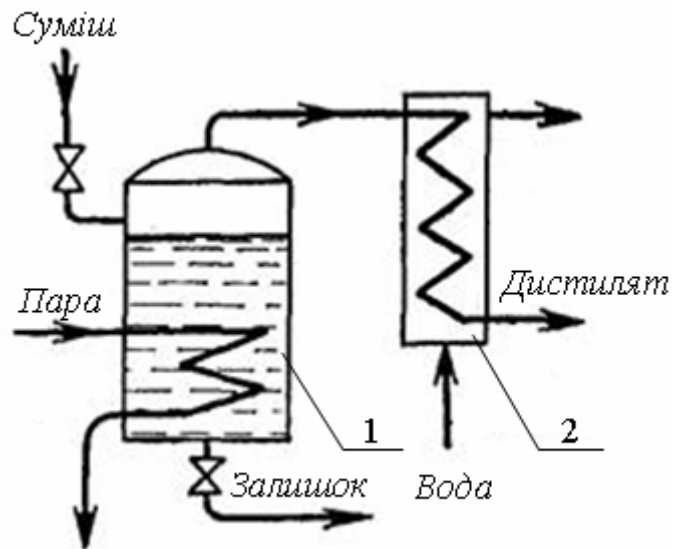


Рисунок 1.1 – Схема апарата для перегонки: 1 – перегінний куб; 2 – конденсатор

Установка для виробництва ароматичних водно-спиртових розчинів (рис. 1.2) складається з ємності для суміші з нагрівачем (1) та холодильника (2). Як суміш використовується ароматизуюча сировина (селера, петрушка часник, тощо) та водно-спиртовий розчин [33-36].

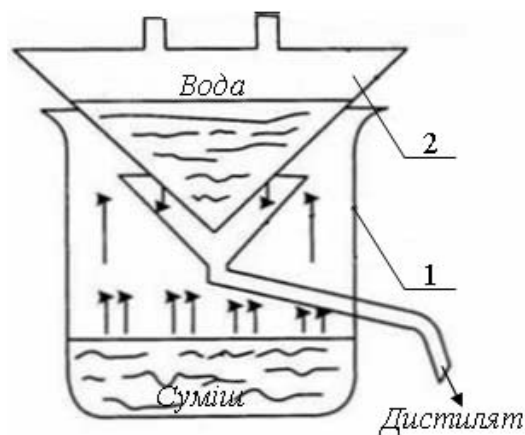
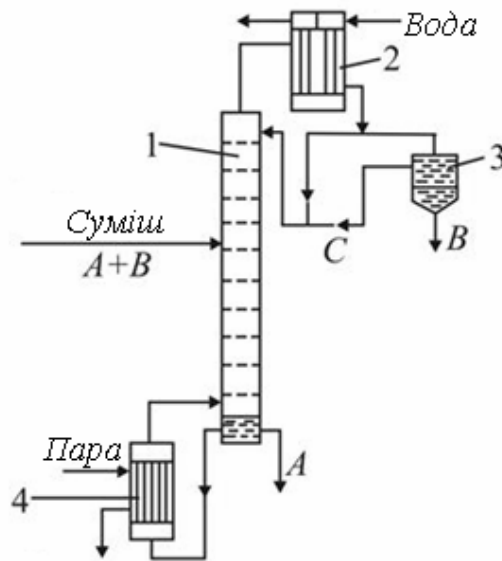


Рисунок 1.2 – Схема ароматизаційної дистиляційної установки: 1 – ємність для суміші з нагрівачем; 2 – холодильник

Під час ректифікації (рис. 1.3) вихідну суміш А+В подають на тарілку колони, яка зрошується зверху розділювальним агентом С. Легколетючий компонент В відбирають у вигляді дистилляту, а важколетючий компонент А з нижньої частини колони [37-40].



**Рисунок 1.3 – Схема установки для ректифікації: 1 – колонна; 2 – конденсатор; 3 – відстійник; 4 – нагрівач**

При цьому ефективність обладнання для організації процесів перегонки та ректифікації обумовлюється ефективністю конструкцій вузлів для підведення теплоти, випаровування компонентів та конденсації отримуваної пари [41-43].

### 1.1.3 Способи організації процесів тепло- та масообміну під час сушіння

Сушіння є одним із найбільш поширених ТМО процесів, які застосовуються зокрема у харчовій промисловості та сільському господарстві. Умови (1.1)–(1.3), а також атмосферний тиск і температура, хімічний склад поверхні Землі й атмосфери обумовлюють таке явище, як круговорот води в природі [44]. З технічної точки зору можна вважати, що в умовах Землі висохне (зволожиться, замерзне) усе, тобто для води фазові переходи I-роду, в умовах Землі, протікають довільно, природно.

Розглянемо з цієї точки зору способи сушіння, які застосовуються в харчовій, мікробіологічній, фармацевтичній промисловості. Різноманітність

способів, методів сушіння сировини та їх апаратних реалізацій обумовлена властивостями матеріалів, що піддаються сушінню, видами зв'язку вологи з матеріалом, метою операції сушіння, її економічною доцільністю.

Основною вимогою реалізації будь-якого теплового сушіння є перенесення та витрати енергії на переведення вологи матеріалу в газовий стан. Однією із класичних класифікацій методів сушіння [45-47] є класифікація за енергетичними властивостями, тобто за методом підведення теплоти та енергії до матеріалу.

У відповідності до даної класифікації широке застосування у світовій практиці отримали конвективний, кондуктивний, радіаційний, сублімаційний способи сушіння, спосіб сушіння в електричному полі та способи, які поєднують принципи перерахованих способів сушіння. Розвитку теорії, технологій та пристроїв теплового сушіння присвячені класичні роботи Ликова О.В. [46, 47], Гінзбурга А.С. [45], Філоненка Г.К., Гришина М.О. [48], роботи сучасних вітчизняних та зарубіжних науковців Долинського А.А., Снежкіна Ю.Ф., Халатова А.А., Баска Б.І., Малецької К.Д., Петрової Ж.О. [49-64], Станкевича Г.М [65-68], Погожих М.І. [69], Потапова В.О. [70], Бурдо О.Г. [71-77], Поперечного А.М. [78-81], Атаманюка В.М. [82-85], Завалія О.О. [86-90], Буляндри О.Ф., Шутюка В.В. [91-96], Рудобашти С.П. [97-99], Сорочинського В.Ф. [100-102], Расева О.І. [103], Diane M. Barrett [104], Liangli Yu [105] та ін.

Найбільш широко в харчовій промисловості використовується обладнання, засноване на конвективних механізмах зневоднення [75]. Однак, такий спосіб характеризується значною енергоємністю процесу сушіння.

Конвективне сушіння – технологічний процес ТМО між матеріалом, що зневоднюється, й сушильним агентом. Як правило, як сушильний агент використовується нагрітий газ (повітря, продукти згорання палива, газоповітряна суміш, перегрітий пар, інертні гази), який одночасно виконує функцію нагрівання матеріалу та поглинання випаруваної вологи. Відзначене

обумовлює порівняльну простоту конструкцій конвективних сушарок [45-48].

Однак по мірі висихання і зменшення теплопровідності матеріалу збільшуються витрати енергії у оточуюче середовище: енергоємність процесу і його тривалість зростають, продукт перегрівається, що позначається на якості готової продукції. Збільшення тривалості сушіння і температури сировини приводять до зниження поживної цінності сушеної продукції, зниження вмісту термолабільних нутрієнтів і погіршення органолептичних характеристик [53].

Таким чином, під час конвективного способу сушіння прагнуть тим, або іншим способом інтенсифікувати процес зневоднення шляхом збільшення площі випаровування та зменшення дифузійного шару над сировиною [75].

Одним із напрямів такого розвитку конвективного способу сушіння є розпилювальний спосіб [61-64, 91, 96, 106, 107]. Волога сировина за допомогою форсунок або дисків, що обертаються, розпилюється (диспергується) в сушильній камері, де контактує з сушильним агентом. Методом розпилення досягається значне збільшення поверхні випаровування. Іншим способом збільшити поверхню випаровування є додавання у сировину поверхнево-активних речовин, отримання піни та наступне її висушування [75, 108]. Для зменшення дифузійного шару та однорідності зневоднення сировини організують фільтрацію сушильного агента через неї, тобто організують фільтраційне сушіння [82-85, 109, 110].

При цьому під час розробки апаратних реалізацій прагнуть до підвищення їх енергоефективності шляхом застосування ефективних способів нагрівання сушильного агента, його рециркуляції, використання нетрадиційних джерел енергії, тощо [55, 60, 67, 68, 71-73, 75, 95, 96, 99, 100].

Кондуктивне сушіння засноване на підведенні теплоти до матеріалу, що зневоднюється, кондуктивним способом, тобто за допомогою теплового руху мікрочастинок в суцільному середовищі, обумовленого наявністю



градієнта температури [45-48]. Як правило матеріал, що зневоднюється, нагрівається за рахунок контакту з нагрівальною поверхнею. Повітря при цьому виконує функцію видалення водяної пари з сушарки. Незважаючи на високу швидкість процесу сушіння, обумовлену високим коефіцієнтом тепловіддачі за даного способу, кондуктивний спосіб в харчовій промисловості застосовується рідко. Пов'язане це з тим, що продукт безпосередньо контактує з нагрівальною поверхнею, тепло розподіляється нерівномірно, що призводить до пересушування продукту. До того ж, харчовий продукт після закінчення обробки втрачає великий відсоток поживних речовин і вітамінів – стає нецікавий споживачу.

Для подолання недоліків під час кондуктивного способу сушіння прагнуть до досягнення однорідності нагрівання матеріалу та запобігання пересушування. Вирішуються поставлені завдання шляхом, наприклад, створення віброкиплячого шару або псевдозрідженого [78-81].

Радіаційне сушіння – спосіб сушіння з використанням променистого теплообміну, найчастіше у інфрачервоному (ІЧ) діапазоні. Теплота до вологої сировини передається ІЧ променями. Ефективність підведення теплоти до матеріалу даним способом обумовлена високою проникаючою здатністю ІЧ випромінювання в матеріал [86-90, 111-113].

Широкого застосування для сушіння харчової сировини набуває спосіб сушіння із застосуванням для нагрівання сировини електричного поля надвисокої частоти (НВЧ). До основних особливостей даного способу слід віднести: здатність проникати на значну глибину всередину матеріалу, незалежність тривалості нагріву до заданої температури від об'єму та форми частинок сировини, відсутність контакту виробу з теплоносієм, високий ККД перетворення енергії в теплоту [74, 76, 114-116]. Недоліками НВЧ-сушіння є неоднорідність зневоднення сировини та висока вартість магнетронних генераторів за досить малого ресурсу роботи (650...700 год.).

Сублімаційне сушіння здійснюється шляхом заморожування вологи сировини з наступною сублімацією льоду у вакуумній камері, минаючи

рідкий фазовий стан води [45-48]. У сублімаційних сушарках основна кількість вологи (75-80%) видаляється при сублімації льоду при температурі продукту нижче 0 °С, і тільки видалення залишкової вологи відбувається при нагріванні матеріалу до 40-60 °С. Сушена продукція, отримувана сублімаційним сушінням відрізняються високою якістю. З точки зору збереження якості сушка сублімацією займає одне з провідних місць серед використовуваних у виробництві способів сушіння. Однак сублімаційні сушарки є складним і дорогим обладнанням, вони складні в експлуатації, мають високі питомі витрати енергії [104, 105, 117-121].

Ще одним способом сушіння, який слід навести, є найпростіший і найстаріший спосіб – природне сушіння. Перевага даного способу полягає в тому, що він не вимагає великих капітальних вкладень, оскільки для нагрівання сировини використовується енергія сонячних променів, а випарувану вологу поглинає навколишнє середовище. Недолік способу – залежність від погодних умов та, як правило, велика тривалість процесу зневоднення. Однак використання даного способу разом з іншими тепловими способами дає позитивний ефект [122-127].

Для подолання недоліків вище означених теплових способів сушіння останнім часом, завдяки розвитку комп'ютерних технологій, широко застосовується математичне та фізико-математичне моделювання процесів ТМО з метою оптимізації існуючих способів сушіння, їх апаратної реалізації та показників якості отримуваної сушеної продукції [52-54, 56-59, 65, 66, 92, 93, 97, 98, 101-103, 128-136].

Таким чином, слід відмітити, що під час перерахованих способів сушіння та їх комбінацій прагнуть до збільшення площі випаровування, зменшення дифузійного шару над сировиною, підвищення ефективності теплопідведення до сировини та автоматизації процесу ТМО.

Виходячи з наведеного літературного огляду, варто вважати, що більшість способів організації ТМО для виконання технологічних операцій,

які використовуються під час обробки сировини у харчовій промисловості – це інтенсифікація природних процесів за рахунок створення певних умов.

Доказом тому, може служити аналіз (1.2):

$$dS = \frac{\delta Q}{T} = \frac{r \cdot \delta m}{T} + \frac{\delta E_B}{T}, \quad (1.8)$$

де  $r$  – питома теплота фазового переходу, Дж/кг;

$\delta m$  – маса води, що перейшла з одного агрегатного (фазового) стану в інший, кг;

$\delta E_B$  – баластна енергія для створення умов і забезпечення фазового переходу, Дж;

$T$  – абсолютна температура, К.

Перший доданок  $\frac{r \delta m}{T}$  у формулі (1.8) визначається витратами енергії безпосередньо на перехід вологи у газовий стан, причому він визначається двома чинниками. Перший природний чинник визначається законами збереження маси та енергії, законами термодинаміки. При цьому кількість вологи, що випаровується, обмежена рівноважним вологовмістом сировини  $w_p(\varphi)$ , який в свою чергу обмежений вологістю оточуючого середовища (наприклад, під час конвективного сушіння – вологістю сушильного агента)  $\varphi$ . Другий чинник визначається температурою  $T$  та вологістю оточуючого середовища  $\varphi$ , які можна штучно змінювати для, наприклад, скорочення тривалості процесу масообміну, або зменшення рівноважного вологовмісту.

Необхідно відмітити, що під час будь-якого процесу швидкість зміни ентропії по мірі досягнення рівноваги зменшується, тобто [45-48]:

$$\frac{dS}{d\tau} < 0. \quad (1.9)$$

Таким чином, більшість способів організації процесу ТМО направлені лише на збільшення швидкості зміни ентропії шляхом збільшення або зменшення штучних складових у формулі (1.8). Для даних способів існує можливість не скільки керувати процесом, скільки прискорювати його, тому їх слід вважати інтенсифікацією природного ТМО [13].

Тоді, в ідеальному випадку, для фазових переходів під час ТМО варто вираз (1.8) трансформувати в:

$$dS = \frac{r\delta m}{T} + \frac{\delta E_A}{T}. \quad (1.10)$$

При цьому, пошук наукових рішень області енергетичної ефективності діяльності людини слід шукати з умови:

$$E_A < E_B. \quad (1.11)$$

Але оскільки зміст  $E_A$  – це деяка енергія активізації, яка є бар'єром, то до індукованих способів організації ТМО слід відносити такі тепломасообмінні процеси, за яких можливим є керування:

1. початком (запуском) процесу;
2. підтримкою процесу;
3. закінченням процесу.

Одним із таких індукованих способів організації ТМО є сушіння змішаним теплопідводом (ЗТП-сушіння) [137]. ЗТП-сушіння засноване на створенні умов для активної гідродинамічної і теплової взаємодії агента сушіння з об'єктом сушіння. «Індукованість» ЗТП-сушіння полягає в тому, що при дотриманні необхідних для реалізації ЗТП-процесу умов між спеціальним тепломасообмінним модулем (ТМО-модулем) з вологою сировиною і сушильним агентом відбувається інтенсивний масообмін [69-70].

Під час ЗТП-сушіння використовуються такі поняття як «запуск» і «зрив» процесу. При цьому керувати «запуском» і «зривом», а також характером процесу зневоднення можна умовно виділеними зовнішніми і внутрішніми чинниками [69]. Особливо важливим є те, що варіювання зовнішніми і внутрішніми чинниками дає можливість керувати питомими енерговитратами на процес зневоднення, інтенсивністю ТМО й якістю отримуваної продукції [138-145].

В даний час процес ЗТП-сушіння досліджений в 2 докторських дисертаціях [69, 70] і 7 кандидатських [138-145]. Завдяки роботам Погожих М.І., Потапова В.О., Цуркана М.М., Сомова О.С., Жеребкіна М.В., Якушенка Є.М. отримано достатньо велику кількість експериментальних результатів для різної сировини та для різних апаратних реалізацій даного способу зневоднення, розвинуто теорію процесу ТМО під час ЗТП-сушіння.

## **1.2 Основи процесу тепломасообміну під час сушіння змішаним теплопідводом вологого колоїдного капілярно-пористого тіла**

Розглянемо основи процесу ТМО під час ЗТП-сушіння вологого колоїдного капілярно-пористого тіла (ККПТ), отримані у роботах вищезначених науковців [69, 70, 138-145].

### **1.2.1 Теоретичні основи процесу тепломасообміну під час сушіння змішаним теплопідводом вологого капілярно пористого колоїдного тіла**

ЗТП-сушіння в роботах [69, 70, 138-145] віднесене до способу сушіння у масообмінних модулях. Для аналізу процесу ЗТП-сушіння використовується одна із теорій термодинаміки нерівноважних процесів, розроблена І. Пригожиним, який для систем віддалених від рівноваги ввів поняття дисипативної структури [146, 147]. Дисипативні структури виникають та існують тільки в системах, що обмінюються енергією та масою

з оточуючим середовищем, тобто поза областю граничних циклів. Якщо ж структура в результаті флуктуації виникне в ізольованій системі, то ентропія системи в цілому зростає, що призведе до деградації самої системи і зникненню структури або до переходу структури у стан з мінімумом виробництва ентропії. Термодинамічними вимогами для існування потенціальних механізмів самоорганізації дисипативних структур є наступні:

1. віддалення від рівноваги;
2. нестійкість системи поблизу стаціонарного стану (спрямованість процесів в сторону з максимумом вільної енергії);
3. наявність флуктуацій;
4. відкритість системи за потоками енергії та маси.

При цьому безпосереднє застосування другого закону термодинаміки до таких відкритих нерівноважних систем зустрічає ряд принципових труднощів. Так поняття ентропії строго визначено лише для рівноважних станів, тобто ентропія системи має певне значення лише в стані рівноваги. У той же час відкриті системи припиняють своє функціонування як такі в стані рівноваги. У відкритих системах замість термодинамічної рівноваги може встановлюватися стаціонарний стан, в якому параметри системи, як і в рівновазі, зберігають свої постійні значення. Однак на відміну від рівноваги це досягається за рахунок врівноваження припливу і стоку речовини й енергії в системі. В термодинамічному відношенні відкриті системи в процесі своєї зміни проходять через ряд нерівноважних станів, що в свою чергу також супроводжується відповідними змінами термодинамічних змінних. В цілому підтримання нерівноважних станів можливе за рахунок збереження градієнтів сил і концентрацій речовин, необхідних для створення відповідних потоків у відкритій системі.

Таким чином, реалізація ТМО під час ЗТП-сушіння, з урахуванням описаної точки зору на динамічну систему, організовується з використанням пристрою, який схематично наведений на рис. 1.4.

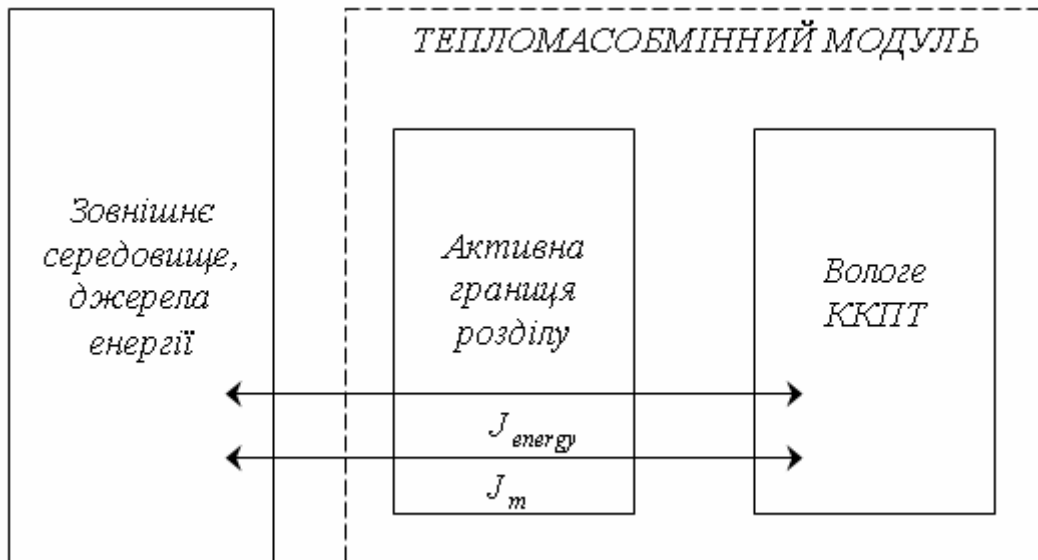


Рисунок 1.4 – Схема пристрою для організації процесу ТМО під час ЗТП-сушіння

Дана схема наводить принципи побудови багатьох пристроїв та природних об'єктів: від механічних пристроїв до живих організмів. При цьому подібність побудови означає подібність керування процесами обміну в будь-якій дискретній частині будь-якої макросистеми.

Під активністю границі розділу слід розуміти її поліфункціональність по відношенню до потоків енергії та маси. Границя розділу повинна виконувати роль ключа, який відстежує взаємодію внутрішньої частини системи з оточуючим середовищем за умови збереження своїх фізичних і хімічних властивостей поза залежністю від інтенсивності та природи потоків енергії. Якщо деякі властивості зовнішнього середовища, сполучені з внутрішньою частиною системи, підтримуються постійними, тоді однією або декількома такими властивостями повинна володіти і границя розділу.

Звідси слідує, що ТМО-модуль повинен знаходитись у слабовідкритому стані за потоком маси, тобто мати активаційний бар'єр. У цьому випадку будуть виконуватись всі чотири термодинамічні вимоги до умов організації дисипативних структур.

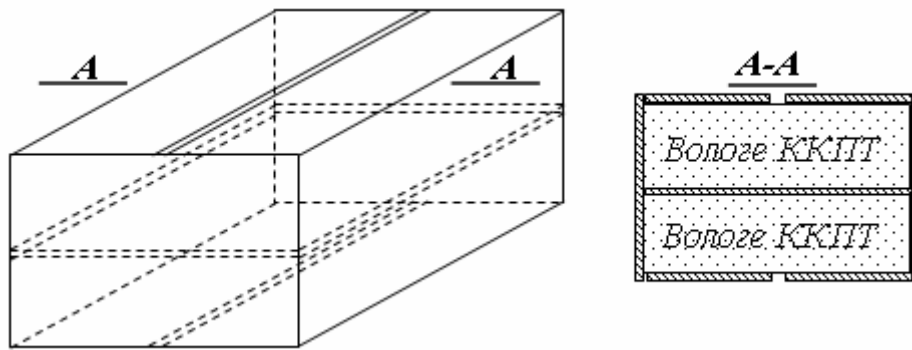
### 1.2.2 Технічна реалізація процесу тепломасообміну під час сушіння змішаним теплопідводом вологого колоїдного капілярно-пористого тіла

У випадку ЗТП-сушіння ТМО-модуль являє собою об'єм, в якому розміщується сировина, що утримує три фази – газову тверду та рідку. Більша частина поверхні ТМО-модуля є газонепроникною та має бути виготовлена з матеріалу, який не чинить великого опору потоку теплоти. Для відведення маси випаруваної вологи на поверхні модуля, вздовж якої рухається потік повітря оточуючого середовища, виконана перфорація (щілини, зазори). Необхідно відмітити, як це буде описано далі, однією із необхідних умов організації процесу ЗТП-сушіння є заповнення ТМО-модуля таким чином, щоб ККПТ або його частинки щільно прилягали до перфорації на поверхні ТМО-модуля. ТМО-модулі, які використовуються під час ЗТП-сушіння, називають функціональними ємностями (ФЄ). Така назва введена проф. Погожих М.І. в першій узагальнюючій роботі з дослідження процесу ЗТП-сушіння [37].

ТМО-модуль – ФЄ – розміщується в потоці повітря, яке омиває його зовнішню поверхню та має постійну визначену температуру (під час застосування ЗТП-процесу для зневоднення вологого ККПТ – температуру сушіння). Масова витрата повітря, яке обдуває ФЄ, повинна бути такою, щоб температура поверхні ФЄ була постійною та дорівнювала температурі сушіння. Таким чином, можна вважати що тіло, розміщене всередині ФЄ та яке складається з трьох фаз – газової, рідкої та твердої, знаходиться в термостаті, тобто всередині пристрою температура якого підтримується постійною за рахунок створення необхідних та достатніх умов для протікання процесів, результатом яких є підтримка постійної температури його внутрішніх стінок.

При цьому ФЄ, які обмежують внутрішній об'єм термостата, умовно розділяють на три основні типи: односторонні, двосторонні, змішаного типу, що являють собою комбінацію двох попередніх.

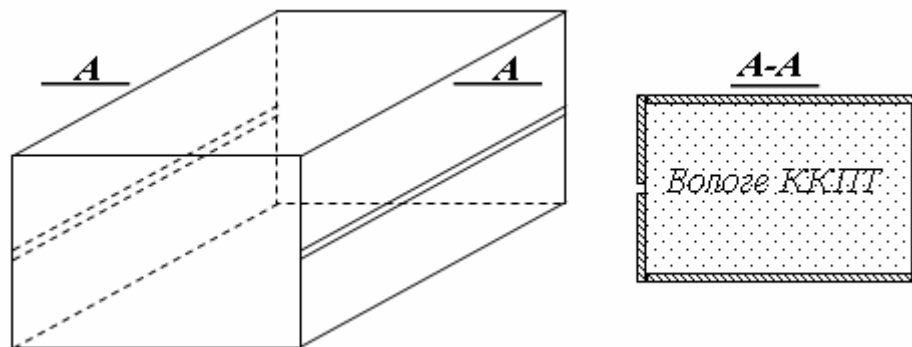




**Рисунок 1.5 – Одностороння ФЄ**

Під односторонніми ФЄ розуміють такі, у яких теплообмінна поверхня та зазори розміщуються з однієї сторони від центральної січної площини (рис. 1.5). Такого типу ФЄ являють собою дві паралельні гофровані площини з перфорованою поверхнею.

Двосторонні ФЄ характеризуються взаємно перпендикулярним розміщенням теплообмінної поверхні та зазорів (рис. 1.6).



**Рисунок 1.6 – Двостороння ФЄ**

Окремим випадком таких ємностей є індивідуальні ФЄ. В індивідуальних ФЄ розміщується цільний шматочок волого ККІТ, який за геометричною формою співпадає з формою ФЄ. Тільки для цього типу ємностей всі геометричні розміри мають обмеження, загальний випадок двосторонніх ємностей припускає один із розмірів нескінченним по відношенню до двох інших.

На теперішній час термостатування під час ЗТП-сушіння реалізовувалось двома способами – конвективно [69, 70, 138-143] та кондуктивно [144, 148, 149]. В типових ЗТП-сушарках підтримка постійної температури стінки ФЄ забезпечується потоком повітря, що омиває ФЄ, яка знаходиться в ТМО камері сушарки. В роботах [144, 148, 149] термостатування організовувалось шляхом підігрівання поверхні ФЄ до температури сушіння з одночасним застосуванням конвективного і кондуктивного способів.

### 1.2.3 Загальна характеристика кривих кінетики процесу сушіння змішаним теплопідводом

Як відомо, на кривих сушіння багатьох видів харчової сировини можна виділити три періоди (рис. 1.7): період нагрівання матеріалу; період постійної швидкості сушіння і період спадаючої швидкості сушіння. Під час конвективного сушіння ККПТ, за умови застосування високих температур, період нагрівання матеріалу зазвичай окремо не виділяють, оскільки одночасно з цим процесом відбувається видалення частини вологи, що знаходиться на поверхні.

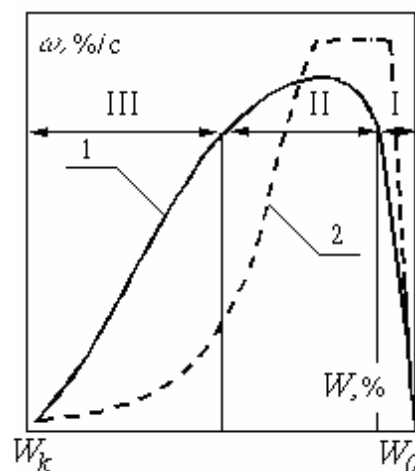


Рисунок 1.7 – Типові криві швидкості сушіння: 1 – ЗТП-сушіння; 2 – конвективне сушіння

Період постійної швидкості сушіння найчастіше спостерігається для ККПТ. У періоді постійної швидкості сушіння температура поверхні матеріалу прагне до температури мокрого термометра та є постійною, що дає можливість розраховувати ТМО характеристики, виходячи зі стаціонарності потоків теплоти і маси. Періоду спадаючої швидкості сушіння відповідає зростання температури матеріалу, яка в кінці процесу зневоднення досягає величини температури сушильного агента.

Розділення кінетики ЗТП-сушіння на характерні періоди вимагає деякого уточнення. Так, наприклад, постійна температура сировини під час сушіння в ФЄ не дорівнює температурі мокрого термометра сушильного агента, а нагрівання матеріалу (особливо при ефекті блокування зовнішнього масообміну) відбувається набагато інтенсивніше, ніж при конвективному сушінні за тих же зовнішніх умов. З численних експериментів випливає, що отримані криві кінетики і швидкості ЗТП-сушіння мають явно виражені характерні ділянки [69]. Тому існує можливість класифікувати кінетичні криві ЗТП-сушіння, виділяючи на них визначені умовні періоди.

Перший період слід віднести до процесу нагрівання об'єкту сушіння і генерації умов «запуску» процесу масообміну. Тривалість цього періоду, як показують дослідження [138-143, 148], визначається:

- зовнішніми чинниками: температурою і швидкістю потоку повітря, що рухається відносно ФЄ, геометричними розмірами і типом ФЄ;
- внутрішніми чинниками: природою вихідної сировини, ступенем подрібнення сировини і ступенем заповнення ФЄ.

Протягом цього періоду швидкість сушіння плавно зростає, особливо це характерно для сушіння матеріалів в індивідуальних ФЄ за температур менше 80 °С. Тому перший період слід вважати періодом нагрівання матеріалу і зростання швидкості сушіння. Тривалість цього періоду може становити від 10% до 20% від загальної тривалості процесу.

Другий період, характеризується тим, що протягом нього досягається максимальна швидкість сушіння. При цьому мається на увазі, що в певний момент часу даного періоду величина швидкості сушіння досягає максимуму. Як показали дослідження [139-141], відносний момент часу і величина поточного вологовмісту матеріалу визначаються температурою сушіння (термостата): з підвищенням температури критичний вологовміст зростає, а час зменшується. Дослідженнями ЗТП-сушіння модельного КПТ з кондуктивним способом підведення теплоти [69] показано, що при створенні штучних умов для підтримки максимальної інтенсивності зневоднення процес носить яскраво виражений нестійкий характер. Повинна виконуватися відповідність швидкості підведення маси до газового середовища всередині ФЄ й інтенсивності зовнішнього стоку маси. Якщо внутрішній потік маси в цьому періоді не збігається з потоком маси в навколишнє середовище (стає меншим), то процес «зривається», що приводить до різкого зменшення швидкості сушіння. Тривалість другого періоду визначається відрізком часу, протягом якого швидкість сушіння коливається в діапазоні 10% від її максимальної величини. Цей період характеризується критичністю по відношенню практично до всіх чинників та вимагає обов'язкової ідентифікації.

Далі швидкість сушіння зменшується – це період спадаючої швидкості сушіння. Протягом нього видаляється волога, що залишилася. Слід відзначити, що і цей період має деякі особливості в порівнянні з іншими способами сушіння. Однією з самих основних відмінностей є те, що крива швидкості сушіння, зображена в координатах  $\omega = f(w)$ , звернена випуклістю до осі ординат. Це вказує на суттєву залежність швидкості ЗТП-сушіння в ФЄ від поточного вмісту вологи. Для інших способів сушіння такі криві практично не зустрічаються. Характер поведінки швидкості в третьому періоді обумовлений явно вираженою неоднорідністю зневоднення матеріалу у об'ємі ФЄ.

Досвід досліджень стану вологи в різних матеріалах з використанням радіоспектроскопічних методів (ЯМР, ЕПР) [69, 138, 142] показав можливість ідентифікації форм зв'язку вологи з матеріалом на молекулярно-кінетичному рівні. При вивченні поведінки вологи в процесі ЗТП-сушіння даними методами було встановлено, що стан води в цій зоні матеріалу слід швидше за все відносити до вільного [69]. Саме в третьому періоді вологовміст матеріалу досягає свого кінцевого (рівноважного) значення. Для звичайних умов конвективного сушіння тривалість цього періоду може перевищувати тривалість двох попередніх майже на порядок. Для ЗТП-сушіння (навіть при помірних режимах) такого співвідношення в тривалості періодів не спостерігалось: найчастіше тривалість третього періоду коливається в межах від 10% до 30% від загальної тривалості процесу. При цьому сушена продукція має низький кінцевий вологовміст – 6,0...8,0%.

#### 1.2.4 Диференціальне рівняння переносу маси під час сушіння змішаним теплопідводом

В роботах з дослідження ЗТП-сушіння наведено диференціальне рівняння переносу маси під час даного процесу, виходячи із наступних теоретичних міркувань. Основними рушійними механізмами ЗТП-процесу вважаються [69, 70] дифузійний і конвективний перенос маси. Для загального потоку вологи можна записати:

$$\vec{j} = \vec{j}_{диф} + \vec{j}_{конв} = -\rho_{с.р.} \cdot a_m \nabla \bar{w} - \rho_{пар} \cdot \vec{v}, \quad (1.12)$$

де  $a_m$  – коефіцієнт масопровідності,  $m^2/c$ ;

$w$  – вологовміст,  $кг/кг$ ;

$\rho_{с.р.}$ ,  $\rho_{пар}$  – відповідно густина сухого тіла та пари,  $кг/м^3$ ;

$v$  – швидкість конвективного потоку,  $м/с$ .

Дане рівняння доповнюється рівнянням для визначення швидкості конвективного потоку. При застосуванні закону збереження імпульсу (система замкнута по потоку повітря):

$$PV\rho_{m.c.} \frac{d\vec{v}}{d\tau} = -\nu\rho_{m.c.} \cdot \vec{v} + \vec{F}_k; \quad (1.13)$$

$$\vec{F}_k = \nu \cdot \xi \cdot \vec{j}_n, \quad (1.14)$$

де  $P$  – пористість тіла, %;

$V$  – об'єм тіла,  $m^3$ ;

$\rho_{m.c.}$  – густина пароповітряної суміші,  $kg/m^3$ ;

$\nu$  – кінематична в'язкість газу,  $m^2/c$ ;

$\xi$  – середня глибина зони випару,  $m$ ;

$\vec{F}_k$  – конвективна сила, обумовлена переносом імпульсу потоком повітря

$\vec{j}_n$ , що натікає в ФЄ,  $H$ .

Густина повітря, що натікає в ФЄ, повинна бути пропорційна густині потоку пари

$$\vec{j}_n = \varepsilon\rho_c a_m \frac{\rho_n}{\rho_{нар}} \nabla \vec{w}, \quad (1.15)$$

де  $\varepsilon$  – відносна частка повітря, що натікає;

$\rho_n$  – густина повітря.

З урахуванням цього, рівняння для швидкості конвективного потоку маси приймає вид:

$$\frac{d\vec{v}}{d\tau} = -\frac{\nu\xi}{PV} \vec{v} + \nu\xi \frac{\rho_n\rho_c}{\rho_{m.c.}\rho_{нар}} \varepsilon a_m \nabla \vec{w}. \quad (1.16)$$

Після усереднення полів вологовмісту і швидкості конвективного потоку та переходу до безрозмірних потенціалів переносу система кінетичних рівнянь ЗТП-сушіння приймає вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{du}{d\tau} &= -k_{11} \cdot u - k_{13} \cdot \varpi \\ \frac{d\varpi}{d\tau} &= -k_{33} \cdot \varpi + k_{31} \cdot u \end{aligned} \quad ; \quad (1.17)$$

де  $u = \frac{w(\tau) - w_p}{w_0 - w_p}$  – безрозмірний потенціал дифузійного переносу;

$\varpi(\tau) = \frac{v(\tau)}{R_V}$  – приведена швидкість конвективного потоку, м/с;

$k_{ij}$  – кінетичні коефіцієнти, які визначаються як:

$$\begin{aligned} k_{11} &= \left[ R_V \left( \frac{3R_V}{\alpha_m} + \frac{1}{\alpha_m} \right) \right]; \quad k_{13} = \frac{\rho_{nap}}{\rho_c} (w_0 - w_p); \\ k_{33} &= \frac{v\xi}{PV}; \quad k_{31} = \varepsilon \frac{\rho_n}{\rho_{m.c.}} \cdot \frac{k_{33}}{k_{13}}, \end{aligned} \quad (1.18)$$

де  $\alpha_m$  – коефіцієнт масообміну, м/с;

$R_V$  – відношення об'єму до поверхні тіла, м;

$w_0$  і  $w_p$  початковий і рівноважний вологовмісти, кг/кг сух. реч.

Рішення системи (1.17) має вигляд:

$$u(\tau) = e^{-\beta\tau} [\cos(\omega\tau) + A \sin(\omega\tau)], \quad (1.19)$$

$$\varpi(\tau) = \varpi_0 e^{-\beta\tau} \left[ \cos(\omega\tau) + \frac{1}{\omega} (-k_{33} + k_{31} + \beta) \sin(\omega\tau) \right], \quad (1.20)$$

де  $\beta = \frac{1}{2}(k_{11} + k_{33})$ ;  $k = \sqrt{k_{11}k_{33} + k_{13}k_{31}}$ ;  $A = \frac{1}{\omega}(-k_{11} - k_{13}\varpi_0 + \beta)$ ;  
 $\omega = \sqrt{k^2 - \beta^2}$ .

На рис. 1.8 наведені типова експериментальна кінетика густини потоку маси під час ЗТП-сушіння та розраховані теоретично кінетики дифузійного і конвективного потоків. В початковий період сушіння внесок дифузійного потоку зменшується під час зростання конвективного потоку маси. Це свідчить про розвиток площі випару всередині об'єму ФЄ.

Спостережуване в експерименті збільшення швидкості ЗТП-сушіння і відсутність періоду постійної швидкості зневоднювання пояснюється поступовим збільшенням внеску конвекційної складової в загальний потік маси. Поступовий ріст інтенсивності конвективної складової обумовлений інерційністю процесу, викликаного опором пористої структури матеріалу. В самій моделі не враховане поступове поглиблення зони випару, однак навіть за такого припущення розрахунок дозволяє стверджувати, що до 50% вологи під час ЗТП-сушіння видаляється конвективним потоком.

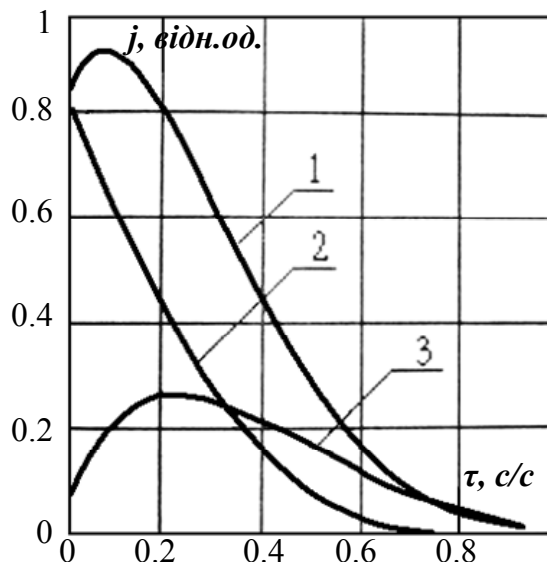


Рисунок 1.8 – Потіки маси: 1 – загальний; 2 – дифузійний; 3 – конвективний



Тобто саме цей потік забезпечує високу масопровідність всієї системи «ФЄ+вологий матеріал» як об'єкта сушіння. Разом з поглибленням зони випару і розвитком поверхні випару ці механізми забезпечують високу інтенсивність процесу переносу маси, що може лімітуватися тільки масопровідністю часток матеріалу. В роботі [69, 139-141] відмічено, під час сушіння в індивідуальних ФЄ існування такого механізму забезпечує високу швидкість зневоднювання шматочків харчової сировини (наприклад, у порівнянні з сушінням в киплячому шарі швидкість більша в 2...3 рази) і високу пористість готової продукції. Також зазначено, що спостереження таких механізмів переносу маси для відомих способів сушіння неможливе через прагнення об'єктів сушіння до стаціонарного стану відразу ж після початку процесу.

Таким чином, ЗТП-сушіння має принципові відмінності, як у зовнішніх умовах протікання процесу, так і поводженням ККПТ, що знаходиться всередині спеціального ТМО-модуля – ФЄ.

### **1.3 Особливості протікання процесу сушіння змішаним теплопідводом**

Однак, незважаючи на велику кількість експериментальних даних для різної сировини і для різних апаратних реалізацій даного способу сушіння, залишається недостатньо повно описаним фізичний механізм низки особливостей протікання ЗТП-процесу. Основні відомі на теперішній час особливості ЗТП-процесу та факти, що спостерігаються під час зневоднення даним способом, які потребують уточнення та пояснення, наступні:

1. наявність «запуску», «блокування», «зриву» ЗТП-процесу;
2. слабка залежність тривалості сушіння від виду сировини;
3. істотна різниця в тривалості сушіння під час використання різних ФЄ: тривалість сушіння в експериментальних циліндричних ФЄ (скляні трубочки) менша у порівнянні із сушінням в типових промислових ФЄ (паралелепіпедна);

4. запуск ЗТП-сушіння будь-якої сировини у будь-якій ФЄ відбувається лише за умови обдування зазору на поверхні ФЄ. При цьому існує залежність характеру ЗТП-процесу від кута обдування, швидкості сушильного агента, наявності турбулізаторів;
5. існують певні вимоги до дисперсності сировини та способу її укладання, а відповідно і до величини порового простору;
6. рециркуляція сушильного агента всередині сушарки (тобто вологість сушильного агента) фактично не впливає на тривалість сушіння;
7. криві швидкості сушіння не мають ділянки постійної швидкості сушіння;
8. кінетика температури сировини має характерні локальні максимуми і мінімуми, що принципово відрізняє даний спосіб від інших відомих способів зневоднення сировини;
9. під час ЗТП-сушіння має місце градієнт температури величиною від 20 до 50% від температури сушіння на товщині сировини 5...10 мм;
10. не знайдений спосіб теплопідведення, який надав би можливості позбутися мінімуму кінетики температури під час зневоднення;
11. зневоднення за умови «запуску» та підтримання ЗТП-процесу відбувається і в разі масообмінних зазорів з одного боку ФЄ;
12. мінімум температури спостерігається і під час сушіння з температурою сушильного агента, яка дорівнює температурі газового середовища лабораторного або виробничого приміщення;
13. ЗТП-процес характеризується певною інертністю;
14. під час сушіння ККПТ з різними рідинами (різні теплофізичні властивості: різні величини питомої теплоти пароутворення, питомої теплоємності та температури кипіння) відбувається зміщення екстремумів кінетики температури;
15. сушена продукція характеризується визначеною якістю: визначена пористість, низький кінцевий вологовміст за один прохід. Причому саме «конкретний» вологовміст, а не будь-який проміжний. За умови передчасної

зупинки процесу сировина у ФЄ представляє собою локальні об'єми, які мають вологовміст починаючи від початкового та закінчуючи кінцевим;

16. зменшення співвідношення ширини масообмінних зазорів до ширини теплообмінних поверхонь вироджує ЗТП-сушіння в конвективне.

17. під час ЗТП-сушіння ККПТ з різною теплопровідністю відбувається зміщення локальних максимуму і мінімуму кінетики температури відносно тривалості сушіння;

18. для запуску ЗТП-процесу необхідний певний вологовміст сировини;

19. сировина повинна мати певну пористість, вона повинна створювати певний опір повітрю;

20. коливання температури сушильного агента різко відбиваються на кінетиці температури сировини, особливо в період збільшення швидкості сушіння.

Пояснити наведені особливості процесу ЗТП-сушіння, виходячи із теоретичних основ даного процесу, наведених в роботах [69, 70, 138-145], не представляється можливим.

Однак дослідження ЗТП-сушіння, які проведені на теперішній час та наведені в даній роботі, а також узагальнення експериментальних та теоретичних даних із вище означених робіт, дають можливість стверджувати що ЗТП-процес є окремим випадком більш загального ефекту. Даний ефект має назву – індукований тепломасообмін (далі ІнтМО) [150].

Отримання нових експериментальних даних під час дослідження ефекту ІнтМО та аналіз отриманої бази даних щодо процесу ТМО під час його окремого випадку – ЗТП-сушіння, нададуть можливість доповнити та узагальнити інформацію про фізичний механізм ефекту ІнтМО. Узагальнення інформації та розробка феноменологічних фізичних і фізико-математичних моделей, що описують кінетичні та динамічні закономірності, механізм та рушійні сили процесу ТМО, нададуть можливість розвинути теоретичні основи ефекту ІнтМО та пояснити його особливості описані вище.

Результатами розвитку теоретичних основ ефекту ІнТМО та його моделювання будуть, по-перше, виявлення можливостей його використання у різних технологіях та техніці, по-друге, ефективне керування процесом ТМО у відповідності до обраної мети його застосування з отриманням заданих результатів або продукції із заданими властивостями.

### Висновки до розділу 1

1. Обґрунтовано перспективність пошуку індукованих процесів, для яких початок процесу в природних умовах не відповідає умовам для процесів, які є дійсно природними, а саме: виробництво ентропії наближається до нуля, а потенційна (вільна) енергія прагне до мінімального значення. Відзначено, для таких індукованих процесів спільним є те, що хоча б один або кілька параметрів або властивостей системи не мають «спорідненості» з навколишнім середовищем і прийняти рівноважне значення можуть тільки при подоланні деякого енергетичного активаційного бар'єру.

2. Доведено на основі проведеного літературного огляду способів організації тепло- та масообміну для виконання низки технологічних операцій, які застосовуються в харчовій, мікробіологічній, фармацевтичній промисловості, що під час їх застосування існує можливість не скільки керувати процесом, скільки прискорювати його, тому їх слід вважати інтенсифікацією природного ТМО.

3. Відзначено, одним із індукованих способів організації ТМО є сушіння змішаним теплопідводом, засноване на створенні умов для активної гідродинамічної і теплової взаємодії агента сушіння з об'єктом сушіння. «Індукованість» ЗТП-сушіння полягає в тому, що при дотриманні необхідних для реалізації ЗТП-процесу умов між спеціальним ТМО-модулем з вологою сировиною і сушильним агентом відбувається інтенсивний масообмін, при цьому для описання процесу зневоднення під час ЗТП-сушіння

використовуються такі поняття як «запуск» і «зрив» процесу, керувати якими, а також характером процесів тепло- та масообміну можна умовно виділеними зовнішніми і внутрішніми чинниками. Відмічено, варіювання зовнішніми і внутрішніми чинниками дає можливість керувати питомими енерговитратами на процес зневоднення, інтенсивністю ТМО й якістю отримуваної продукції.

4. Виходячи із наукових основ процесу ТМО під час ЗТП-сушіння, отриманих на теперішній час у роботах з дослідження даного процесу, відзначено, що незважаючи на велику кількість експериментальних даних для різної сировини і для різних апаратних реалізацій даного способу сушіння, залишається недостатньо повно описаним фізичний механізм низки особливостей протікання ЗТП-процесу.

5. Відзначено, що дослідження ЗТП-сушіння, які проведені на теперішній час та наведені в даній роботі, а також узагальнення експериментальних та теоретичних даних щодо процесу ЗТП-сушіння, дають можливість стверджувати що ЗТП-процес є окремим випадком більш загального ефекту – ефекту індукованого тепломасообміну (ІнТМО).

6. Відзначено, що необхідність розвитку теоретичних основ ефекту ІнТМО та його моделювання полягає в тому, що розробка феноменологічних фізичних і фізико-математичних моделей для описання кінетичних та динамічних закономірностей, механізмів та рушійних сил ефекту ІнТМО надасть можливість виявлення перспектив його використання у різних технологіях і техніці та дозволить ефективно керувати процесом ТМО у відповідності до мети його застосування з отриманням заданих результатів або продукції із заданими властивостями.

## РОЗДІЛ 2

### ГІПОТЕЗА ЕФЕКТУ ІНДУКОВАНОГО ТЕПЛОМАСООБМІНУ, МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МАТЕМАТИЧНА ОБРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

#### 2.1 Феноменологічна гіпотеза ефекту індукованого тепломасообміну

Узагальнення даних, наведених в роботах [69, 70, 138-144], та аналіз результатів, які будуть представлені в даній роботі, дозволяють стверджувати, що процес ЗТП-сушіння є окремим випадком більш загального ефекту – ефекту індукованого тепломасообміну (ІнТМО) [118].

Скористаємось деякими результатами, отриманими в згаданих роботах, та основними положеннями нерівноважної термодинаміки та синергетики для розкриття суті ефекту ІнТМО та формулювання наукової гіпотези роботи.

Введемо поняття динамічної системи [151-155]. Під динамічною системою розуміють будь-який об'єкт або процес, для якого однозначно визначене поняття стану, як сукупності деяких величин у даний момент часу, та заданий закон, що описує зміну початкового стану з часом.

##### 2.1.1 Суть феномена ефекту індукованого тепломасообміну, необхідні та достатні умови для його спостереження

Під динамічною системою під час ефекту ІнТМО розуміється система, що складається у загальному випадку із термостата, виділений внутрішній об'єм якого утримує рідину та газ, може утримувати сухі речовини. Теплоносієм та масоносієм є зовнішнє тіло. Під термостатом [156] розуміється система, температура якої підтримується постійною за рахунок створення необхідних та достатніх умов для протікання процесів,

результатом яких є підтримка постійної температури внутрішнього виділеного об'єму термостата.

Таким чином, є термостат, його виділений внутрішній об'єм  $V_m$  відокремлюється стінкою, що має площу  $S_m$ . Температура термостата  $T_m$  підтримується постійною. У внутрішньому об'ємі термостата знаходиться рідина об'ємом  $V_p$  і газ об'ємом  $V_g$ , який є сумішшю повітря і пари рідини. Також, як відмічено вище, термостат може містити суху речовину об'ємом  $V_{c.p.}$  нерозчинну або частково розчинну у рідині, що проявляє або ні ліофільну активність, має або ні певну структуру (будову).

Тиск в термостаті постійний і дорівнює атмосферному  $p$ . З атмосферою (навколишнім середовищем будь-якої температури) термостат сполучається через обтюратор. Під обтюратором розуміється пристрій, який служить для обмеження доступу газу навколишнього середовища до внутрішнього об'єму термостата. Під час ІнтМО обтюратор являє отвір в термостаті, з розміщеним в ньому КПТ, об'єм якого значно менший внутрішнього об'єму термостата  $V_{обт} \ll V_m$ . Площа поверхні обтюратора значно менша за площу поверхні термостата  $S_{обт} \ll S_m$ .

Таким чином, термостат з двома або трьома фазами та обтюратором утворюють систему, яка має два рівноважних стани:

- нестійка рівновага – температура всіх частин динамічної системи асимптотично прагне до температури термостата, при цьому практично відсутній масообмін з навколишнім середовищем;

- стійка рівновага температура всіх частин динамічної системи дорівнює температурі термостата, при цьому рідка фаза всередині термостата відсутня.

Сам ефект ІнтМО полягає у переході системи від нестійкої рівноваги до стійкої, який супроводжується розсіюванням теплоти за рахунок переходу рідкої фази в термостаті у газовий стан (рис. 2.1).

Пароповітряне середовище (газова суміш) всередині термостата під час ІнтМО вважається суцільним за парціальним тиском пари рідини. Під

суцільним середовищем [157-159] розуміється неперервна субстанція, для якої будь-яка мала її частина (надмолекулярного рівня) має властивості цілого. Використання поняття суцільного середовища виключає з розгляду молекулярний рух (тобто враховуються тільки середні показники молекулярного руху, наприклад, тиск, густина і температура) і вивчається тільки рух, викликаний зовнішніми силами. Найменший об'єм суцільного середовища всередині термостата значно більший у порівнянні з міжмолекулярними відстанями, але значно менший об'єму термостата. Всі характеристики такого суцільного середовища є неперервними функціями просторових координат і часу, крім границь розділу з твердою або рідкою фазою. При цьому справедливими для суцільного середовища будуть: рівняння руху або рівноваги середовища, одержувані як висновки основних законів механіки; рівняння нерозривності; закон збереження енергії [157].



Рисунок 2.1 – Рух системи від нестійкої рівноваги до стійкої під час ІнтМО

Інтегрально всередині термостата може перебувати три фази – тверда, рідка і газоподібна, які спочатку знаходяться між собою в рівновазі. Суцільне газове середовище за парціальним тиском пари рідини (далі – суцільне газове середовище) утворюється через те, що стінки термостата виконані з паронепроникного матеріалу, а масообмін з навколишнім середовищем



можливий тільки через обтюратор, площа якого, принаймні, на порядок менша площі поверхні термостата (від якої до внутрішнього середовища термостата може надходити теплота), що свідчить про «затиснуті» умови. Відхилення будь-якого параметру від рівноважного значення примушує суцільне середовище протидіяти його зміні. Тобто, якщо з будь-яких причин відбудеться зміна рівноважного вмісту пари рідини в пароповітряній суміші всередині термостата, це викличе зміну кількості, складу і розподілу рідини за рахунок її переходу з рідкого стану в газовий. Перехід рідини в газовий стан відбувається шляхом дифузії пари в суцільне газове середовище. Таким чином, оскільки суцільне газове середовище знаходиться всередині термостата, то парціальний тиск пари рідини даного середовища дорівнює тиску насиченої пари рідини за даної температури.

Ефект ІнТМО спостерігається, якщо створити флуктуації, наприклад, концентрації частинок пари рідини в суцільному газовому середовищі всередині термостата, шляхом винесення частини суцільного газового середовища через обтюратор. На таку флуктуацію система «відреагує» відновленням парціального тиску пари рідини до рівня насиченої пари за рахунок переходу рідкої фази в газову. Результатом описуваного процесу є видалення рідкої фази з термостата, а саме – ефект ІнТМО [150].

При цьому обтюратор термостата не містить або частково містить рідину і, в загальному випадку, характеризується коефіцієнтом фільтрації потоку газу  $k_\phi$ , що задовольняє умові:

$$-k_\phi \nabla p \cong j_{\text{диф}}, \quad (2.1)$$

де  $j_{\text{диф}}$  - дифузійний потік газу через обтюратор,  $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$ ;

$\nabla p$  – градієнт тиску в обтюраторі,  $\text{Па/м}$ .

При цьому для  $\Delta p$  в обтюраторі виконується умова:

$$\Delta p \ll p_\infty. \quad (2.2)$$

Для активації ефекту ІнтМО використовується механічна енергія потоку повітря, який рухається відносно зовнішньої поверхні обтюратора (енергія активації  $E_A$ ):

$$dE_A = d(p_n V) + \xi \cdot dE_k, \quad (2.3)$$

де  $\xi$  – безрозмірний коефіцієнт, що показує частину кінетичної енергії, яка розсіюється в об'ємі обтюратора:  $\xi < 1$ ;

$p_n$  – повний тиск потоку повітря, Па.

Очевидним є те, що при цьому  $E_A < E_B$ , оскільки мова йде про механічну енергію потоку, а не про суму механічної енергії і тепловмісту, як під час інтенсифікації природних процесів.

Перераховані умови є необхідними для спостереження ефекту ІнтМО, який виникає на шляху досягнення системою стійкої рівноваги. При цьому стійка рівновага досягається тільки за умови, коли маса рідини в термостаті буде дорівнювати нулю:  $m_p = 0$ .

Додатковими (достатніми для спостереження і регулювання ефекту) є умови:

1. Наявність флуктуацій параметрів газу в об'ємі обтюратора.
2. Теплоємність термостата повинна бути настільки великою, щоб виконувалася умова:

$$m_m c_m \Delta T_m \gg \Delta Q \text{ при } \Delta T_m \rightarrow 0, \quad (2.4)$$

де  $\Delta Q$  – кількість теплоти, «винесеної» із термостата з газом, що утримує пару рідини, яка випарувалася за тривалість спостереження  $\Delta \tau$ .

3. Ефект спостерігається за кінцевий (лабораторний) проміжок часу  $\Delta \tau$ :

$$\Delta\tau \ll \Delta\tau_{\text{диф}}, \quad (2.5)$$

де  $\Delta\tau_{\text{диф}}$  – тривалість спостереження, впродовж якої термостат втратив масу рідини  $\Delta m_p$  без флуктуацій параметрів газу в об’ємі обтюратора, тобто за рахунок дифузійного потоку маси.

4. Флуктуації в об’ємі обтюратора  $V_{\text{обт}}$  можуть бути просторові і (або) за часом. Однак якщо вважати, що газ в цьому об’ємі за властивостями близький до ідеального, то стан його описується замкненими лініями по координатам  $p, V, T, v$  з центром  $k$ , тобто:

$$\delta\left(\frac{p}{nT}\right) \rightarrow k, \quad (2.6)$$

де  $k$  – стала Больцмана.

При цьому флуктуації  $\delta$ , в даному випадку, створюються зовнішнім по відношенню до термостата середовищем, а релаксація відбувається за рахунок внутрішньої системи термостата і його тепловмісту. Виходячи з умови нескінченно великої ентальпії термостата, релаксація флуктуацій в обтюраторі буде залежати від теплофізичних властивостей газової і рідкої фаз термостата. При цьому релаксація флуктуацій, в будь-якому випадку, буде супроводжуватися явищами фазового переходу, перенесення теплоти і маси, а, отже, виникненням відповідних рушійних сил: градієнтів температури і парціального тиску повітря і пари рідини в об’ємі термостата  $V_m$ .

5. За флуктуації температури на границі розділу «обтюратор – навколишнє середовище», обтюратор повинен мати здатність «виносу» рідини за рахунок, наприклад, капілярних сил в навколишнє середовище.

6. Температура термостата може бути більшою за температуру кипіння рідини, при цьому температура рідини за ефекту ІнТМО знаходиться всередині граничного циклу:

$$T_{крисст} < T_p < T_{кип}, \quad (2.7)$$

де  $T_{крисст}$  і  $T_{кип}$  – температури кристалізації та кипіння рідини за даного тиску  $p$  (термостата і навколишнього середовища).

В цьому і полягає, як описано вище, спостережуваний ефект ІНТМО – рух системи від нестійкої до стійкої рівноваги, що супроводжується видаленням рідкої фази з об'єму термостата.

### 2.1.2 Балансні рівняння ефекту індукованого тепломасообміну для випадку флуктуації концентрації частинок рідини в обтюраторі

Феноменологічно для процесу масообміну між термостатом та масоносієм, яким є для випадку, що розглядається, повітря оточуючого термостат середовища (повітря навколишнього середовища), можна записати [150, 160]:

$$I_m^\infty = I_m^{ind} = I_m^{sun} \quad (2.8)$$

де  $I_m^\infty$  – потік маси пари рідини, що уноситься потоком повітря, який рухається відносно обтюратора,  $кг/с$ ;

$I_m^{ind}$  – індукований потік маси пари рідини, що проходить через обтюратор,  $кг/с$ ;

$I_m^{sun}$  – умовний потік маси пари рідини до суцільного газового середовища у внутрішньому об'ємі термостата за рахунок випаровування (конденсації) рідкої фази,  $кг/с$ .

Розрахуємо потік маси пари рідини  $I_m^{інд}$ , що проходить через обтюратор. Цей потік дорівнює масі молекул пари рідини  $dm_{інд}$ , що проходять через нього за одиницю часу:

$$I_m^{інд} = \frac{dm_{інд}}{d\tau} = \frac{\mu}{N_A} \cdot \frac{dN_{інд}}{d\tau}, \quad (2.9)$$

де  $\mu$  – молярна маса рідини, *кг/моль*;

$N_A$  – число Авогадро,  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ , *1/моль*;

$dN_{інд}$  – кількість молекул пари рідини, що проходять через обтюратор, *шт. молекул*.

Будемо вважати, що причиною потоку маси є флуктуації зовнішнього середовища біля зовнішньої поверхні обтюратора. Тобто у потоці повітря, що рухається відносно зовнішньої поверхні обтюратора, виникають флуктуації поперечної складової швидкості потоку. В результаті таких флуктуацій відбувається винесення деякого об'єму із обтюратора в оточуюче середовище. Даний об'єм (рис. 2.2), позначений символом  $V_{інд}$ , розраховується за формулою:

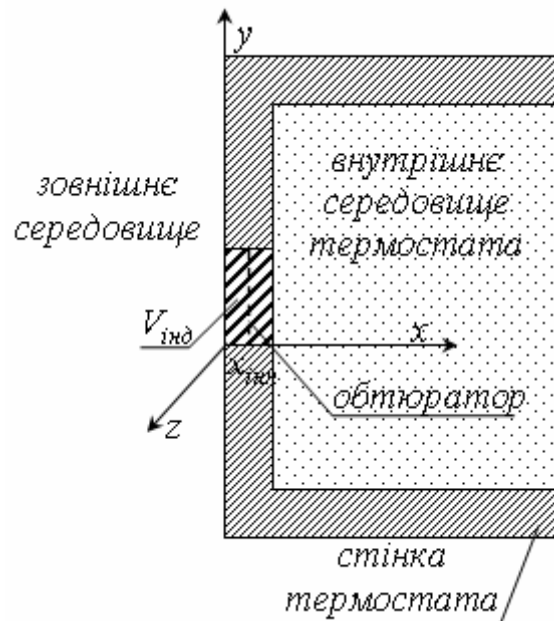
$$V_{інд} = x_{інд} \cdot y_{інд} \cdot z_{інд}, \quad (2.10)$$

де  $y_{інд}$  дорівнює ширині поверхні обтюратора  $h_{обт}$ , яка граничить з оточуючим середовищем, *м*;

$z_{інд}$  дорівнює довжині поверхні обтюратора  $l_{обт}$ , яка граничить з оточуючим середовищем, *м*.

Таким чином, добуток  $y_{інд}$  та  $z_{інд}$  дорівнює площі поверхні обтюратора  $S_{обт}$ , яка є його границею з оточуючим середовищем:

$$y_{ind} \cdot z_{ind} = h_{обт} \cdot l_{обт} = S_{обт} \cdot \quad (2.11)$$



**Рисунок 2.2 – Поперечний переріз термостата**

Слід вважати, що  $S_{обт}$  визначається конструкційними особливостями термостата, тому її величина не змінюється з часом та не залежить від будь-яких параметрів зовнішнього та внутрішнього середовища. А величина  $x_{ind}$  залежить від величини флуктуації поперечної складової швидкості потоку повітря, що рухається відносно зовнішньої поверхні обтюратора, та від властивостей матеріалу, із якого він виконаний. Під властивостями обтюратора, у першому наближенні, розуміється його опір потоку пароповітряної суміші, спрямованому всередину термостата або із нього. Те ж відноситься і до визначеної частини загального потоку повітря, що рухається відносно зовнішньої поверхні обтюратора, величина якої обумовлена флуктуацією його поперечної складової. Опір обтюратора визначається фільтраційними властивостями його сухого скелету й кількістю рідини та пароповітряної суміші, яку він утримує, а також умовою  $p = const$ .

Під час ІНТМО кількість сухих речовин обтюратора можна вважати постійною, а кількість рідини та пароповітряної суміші, які він утримує, може змінюватись через рух системи до динамічної рівноваги або через зміну параметрів суцільного газового середовища всередині термостата. Таким чином, опір обтюратора визначається поточним вмістом рідини у ньому та теплофізичними властивостями його сухого скелету.

Оскільки поточний вміст рідини обтюратора, а також амплітуда флуктуації поперечної складової швидкості потоку повітря, що рухається відносно зовнішньої поверхні обтюратора, змінюються з часом, то можна вважати, що і  $x_{інд}$  змінюється з часом. Тоді враховуючи (2.11), запишемо:

$$V_{інд} = x_{інд}(\tau) \cdot S_{обт}. \quad (2.12)$$

При цьому кількість частинок пари рідини, які виносяться з об'ємом  $V_{інд}$  дорівнює:

$$N_{інд} = V_{інд} \cdot \langle n_{інд} \rangle, \quad (2.13)$$

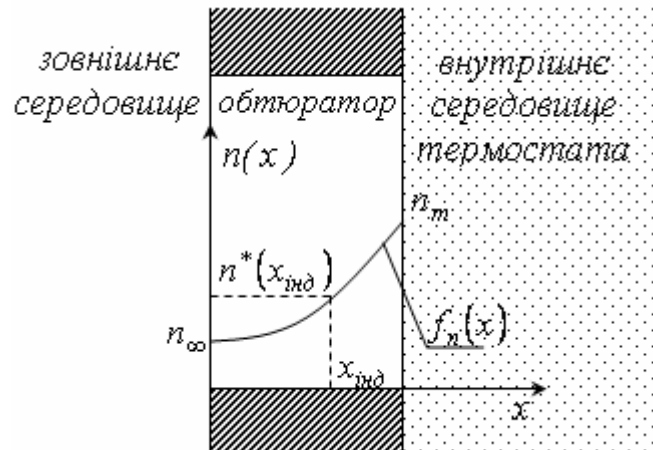
де  $\langle n_{інд} \rangle$  – середня концентрація молекул пари рідини, які виносяться з, *шт. молекул/м<sup>3</sup>*.

Концентрація молекул рідини має визначене розподілення в об'ємі  $V_{інд}$ . При цьому будемо вважати, що вздовж осей  $Oy$  та  $Oz$  концентрація постійна, а вздовж осі  $Ox$  є визначений градієнт концентрації, що описується функцією  $f_n(x)$  (рис. 2.3). Тоді середня концентрація частинок в  $V_{інд}$  розраховується наступним чином:

$$\langle n_{інд} \rangle = \frac{1}{(n^*(x_{інд}(\tau)) - n_\infty)} \cdot \int_0^{x_{інд}(\tau)} f_n(x) dx, \quad (2.14)$$

де  $n_\infty$  – концентрація молекул пари рідини на зовнішній границі  $V_{інд}$ , тобто на границі даного об'єму з оточуючим середовищем, *шт. молекул/м<sup>3</sup>*;

$n^*(x_{інд}(\tau))$  – концентрація молекул пари рідини на внутрішній границі  $V_{інд}$ , тобто на границі даного об'єму із суцільним середовищем всередині термостата, *шт. молекул/м<sup>3</sup>*.



**Рисунок 2.3 – Розподілення концентрації частинок пари рідини суцільного газового середовища в обтюраторі**

Виходячи з (2.14),  $\langle n_{інд} \rangle$  є функцією  $x_{інд}$ .

Запишемо повний диференціал для кількості молекул пари рідини, які виносяться з об'ємом  $V_{інд}$  (формула (2.13)):

$$dN_{інд} = \frac{\partial(V_{інд} \cdot \langle n_{інд} \rangle)}{\partial \tau} d\tau, \quad (2.15)$$

перенесемо  $d\tau$  в ліву частину рівності:

$$\frac{dN_{інд}}{d\tau} = \frac{\partial(V_{інд} \cdot \langle n_{інд} \rangle)}{\partial \tau} = \frac{\partial V_{інд}}{\partial \tau} \langle n_{інд} \rangle + \frac{\partial \langle n_{інд} \rangle}{\partial \tau} V_{інд}. \quad (2.16)$$

Враховуючи (2.12), будемо мати:



$$\frac{dN_{інд}}{d\tau} = S_{обт} \left( \frac{\partial x_{інд}}{\partial \tau} \langle n_{інд} \rangle + \frac{\partial \langle n_{інд} \rangle}{\partial \tau} x_{інд} \right). \quad (2.17)$$

Підставимо (2.17) в (2.9):

$$I_m^{інд} = \frac{dm_{інд}}{d\tau} = \frac{\mu}{N_A} \cdot S_{обт} \left( \frac{\partial x_{інд}}{\partial \tau} \langle n_{інд} \rangle + \frac{\partial \langle n_{інд} \rangle}{\partial \tau} x_{інд} \right). \quad (2.18)$$

Перетворимо вираз (2.18) наступним чином:

$$\begin{aligned} I_m^{інд} &= \frac{\mu}{N_A} \cdot S_{обт} \left( \frac{\partial x_{інд}}{\partial \tau} \langle n_{інд} \rangle + \frac{\partial \langle n_{інд} \rangle}{\partial x_{інд}} \frac{\partial x_{інд}}{\partial \tau} x_{інд} \right) = \\ &= \frac{\mu}{N_A} \cdot \frac{\partial x_{інд}}{\partial \tau} \left( \langle n_{інд} \rangle + \frac{\partial \langle n_{інд} \rangle}{\partial x_{інд}} x_{інд} \right) S_{обт}. \end{aligned} \quad (2.19)$$

З отриманого виразу видно, що густина потоку маси пари рідини через обтюратор дорівнює:

$$j_m^{інд} = \frac{\mu}{N_A} \cdot \frac{\partial x_{інд}}{\partial \tau} \left( \langle n_{інд} \rangle + \frac{\partial \langle n_{інд} \rangle}{\partial x_{інд}} x_{інд} \right). \quad (2.20)$$

При цьому, якщо розглядати внутрішню задачу, для того, щоб газове середовище всередині термостата залишалось суцільним за парціальним тиском пари рідини, таж кількість частинок повинна випаруватись.

Маса рідин, що випаровується в одиницю часу, тобто потік маси суцільного газового середовища всередині термостата, який утворюється за рахунок випаровування через прагнення системи до динамічної рівноваги і який протікає зі швидкістю дифузії, розраховується за формулою:

$$\frac{dm_{\text{вип}}}{d\tau} = f_{\text{вип}}(p, T) \frac{\mu}{N_A} \cdot S_{\text{вип}}, \quad (2.21)$$

де  $f_{\text{вип}}(p, T)$  – функція, яка визначається тиском і температурою всередині термостата та залежить від фізичних властивостей рідини в ньому, *шт.молекул/с*;

$S_{\text{вип}}$  – площа випаровування, яка обумовлюється властивостями ККПТ (розмір частинок, наявність газонепроникних включень, спосіб розміщення у внутрішньому об'ємі термостата, тощо),  $m^2$ .

Звідси, очевидно, густина потоку маси в суцільне газове середовище всередині термостата, що утворюється за рахунок переходу рідини в газоподібний стан, буде дорівнювати:

$$j_m^{\text{вип}} = f_{\text{вип}}(p, T) \frac{\mu}{N_A}. \quad (2.22)$$

Будемо вважати, що через прагнення системи до динамічної рівноваги, маса пари рідини, яка виноситься зовнішнім середовищем, компенсується переходом рідкої фази всередині термостата в газовий стан, чим підтримується суцільність газового середовища за парціальним тиском пари рідини. Тоді прирівняємо (2.19) і (2.21):

$$\frac{dm_{\text{інд}}}{d\tau} = \frac{dm_{\text{вип}}}{d\tau}, \quad (2.23)$$

а в явному вигляді:

$$\frac{\mu}{N_A} \cdot \frac{\partial x_{\text{інд}}}{\partial \tau} \left( \langle n_{\text{інд}} \rangle + \frac{\partial \langle n_{\text{інд}} \rangle}{\partial x_{\text{інд}}} x_{\text{інд}} \right) S_{\text{обм}} = f_{\text{вип}}(p, T) \frac{\mu}{N_A} S_{\text{вип}}. \quad (2.24)$$

Якщо врахувати (2.20) і (2.22):

$$S_{обт} \cdot j_m^{інд} = S_{вун} \cdot j_m^{вун}, \quad (2.25)$$

або

$$j_m^{інд} = \frac{S_{вун}}{S_{обт}} \cdot j_m^{вун}. \quad (2.26)$$

Якщо густину потоку маси (2.22) в суцільне газове середовище всередині термостата, що утворюється за рахунок переходу рідини в газоподібний стан, помножити на питому теплоту пароутворення, то отримаємо густину теплового потоку, який витрачається на випаровування рідини всередині термостата:

$$j_q^{вун} = r \cdot j_m^{вун} = f_{вун}(p, T) \frac{\mu}{N_A} \cdot r. \quad (2.27)$$

Помножимо та розділимо праву частину (2.26) на питому теплоту пароутворення:

$$j_m^{інд} = \frac{S_{вун}}{S_{обт}} \cdot j_m^{вун} \cdot \frac{r}{r}, \quad (2.28)$$

враховуючи (2.26), отримаємо для ІнтМО:

$$j_m^{інд} = \frac{1}{r} \cdot \frac{S_{вун}}{S_{обт}} \cdot j_q^{вун}. \quad (2.29)$$

Виходячи з отриманих виразів (2.24) і (2.29), можна зробити наступні висновки. З (2.24) видно, що флуктуації часова  $\left( \frac{\partial x_{інд}}{\partial \tau} \right)$  і просторова

$\left(\frac{\partial \langle n_{ind} \rangle}{\partial x_{ind}}\right)$  в об'ємі обтюратора «індукують» потік маси, який визначається залежністю парціального тиску насичених парів від температури. Отже, тепловий потік, що розсіюється за рахунок виносу потоку маси в навколишнє середовище визначається фізичними властивостями рідини ( $f_{вин}(p, T)$ ), способом заповнення об'єму термостата ( $S_{вин}$ ) і конструкцією обтюратора ( $S_{обт}$ ). Виходячи з вихідних умов, даний тепловий потік повинен бути нехтовно малим у порівнянні з тепловмістом стінок термостата. При повному видаленні рідкої фази з об'єму термостата, система приходить у стійку рівновагу.

Таким чином, встановлено, що тепловий потік, який розсіюється всередині термостата, пропорційний потоку маси рідини, яка виноситься із термостата в газовому стані, тобто потік маси із термостата індукує потік теплоти до його внутрішнього середовища. При цьому коефіцієнт пропорційності між потоками обумовлюється фізичними властивостями рідини, способом заповнення внутрішнього об'єму термостата і конструкцією обтюратора. Вираз (2.29) є рівнянням ефекту ІНТМО.

Виходячи з вищевикладеного, наукова концепція роботи полягає у наступному: теорія – індукування тепломасообміну в термостаті з обтюратором флуктуаціями параметрів газу в обтюраторі сприятиме ефективному випаровуванню рідини в термостаті; техніка – термостат з обтюратором, що містить рідину та (або) вологе колоїдне капілярно-пористе тіло, являє собою керований тепломасообмінний апарат для харчової промисловості.

## 2.2 Об'єкт і предмет дослідження

Об'єктом дослідження є процеси тепло- та масообміну при виробництві харчових продуктів. З метою перевірки запропонованої феноменологічної

гіпотези предметом дослідження були кінетичні та динамічні характеристики ІнтМО, який реалізовується в термостаті.

Для спостереження ефекту ІнтМО використовується пристрій, схема якого наведена на рис. 2.4. Цифрами на рисунку позначені: 1 – термостат; 2 – трубки, через які продувається потік повітря; 3 – тіло (ККПТ), що складається з трьох фаз: газової, рідкої і твердої; 4 – термомпари; 5 – обтюратори.

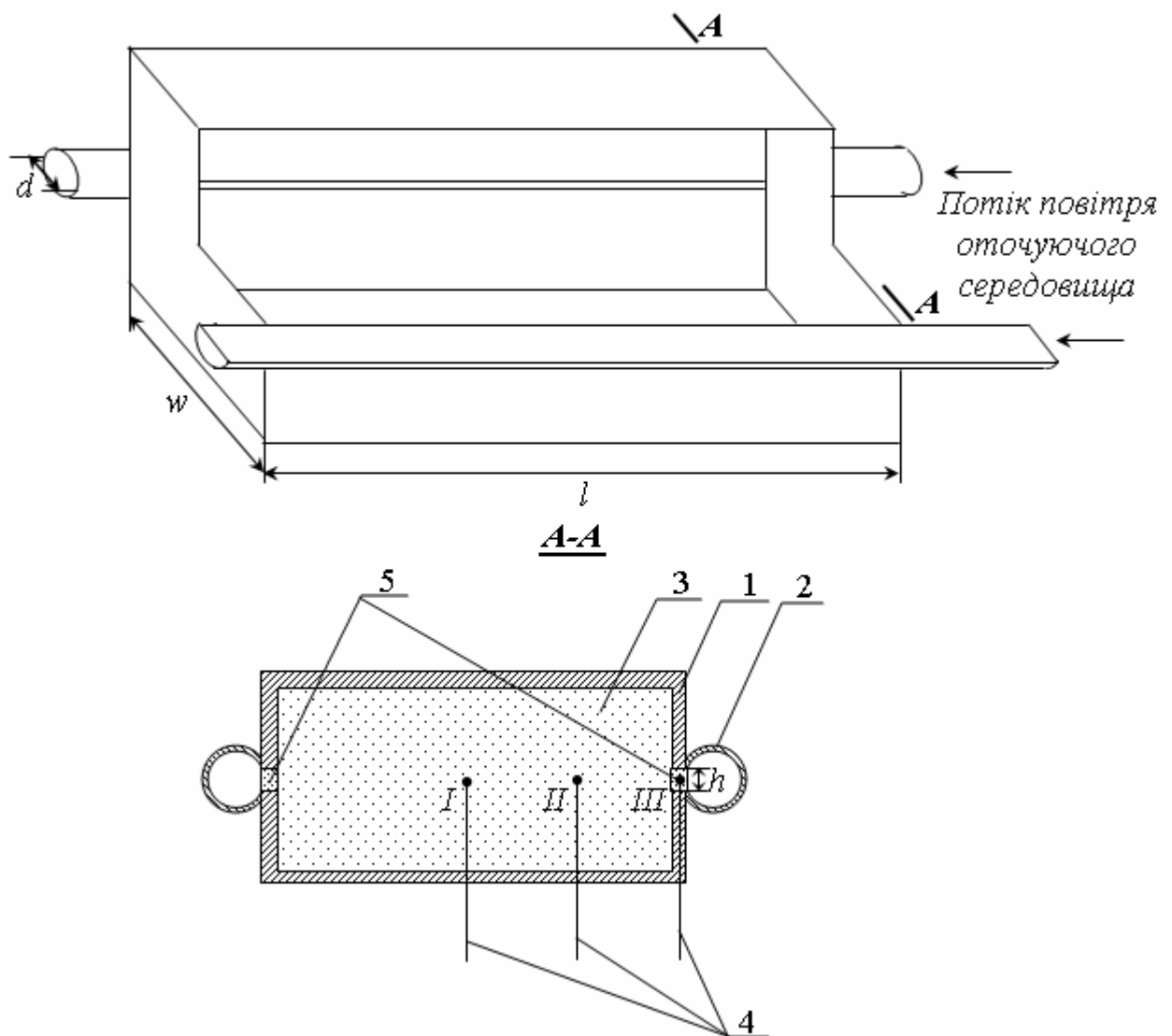


Рисунок 2.4 – Схема пристрою для спостереження ефекту ІнтМО: 1 – термостат; 2 – трубки, через які продувається потік повітря; 3 – тіло (ККПТ), що складається з трьох фаз: газової, рідкої і твердої; 4 – термомпари; 5 – обтюратори (характерні розміри, мм:  $l=100$ ;  $w=20$ ;  $d=10$ ;  $h=1$ )

Судити про «запуск» ефекту ІнтМО, можна виходячи з характеру кінетики температури в різних точках всередині термостата, яку отримують реєстрацією сигналу від термопар.

Організація ефекту ІнтМО полягає в наступному. Всередину термостата розміщують тіло, що складається з твердої, рідкої і газової фаз (вологе ККПТ). Через певний час температура тіла всередині термостата буде асимптотично прагнути до температури термостата. Далі через трубки, зображені на рис. 2.4, організовується рух повітря з визначеною швидкістю, такою, що в результаті турбулентного режиму плин створюється флуктуація поперечної складової швидкості потоку повітря. Ефект ІнтМО «запускається». Термограми, що отримують у разі «запуску», «протікання» та «закінчення» ефекту ІнтМО, представлені на рис. 2.5.

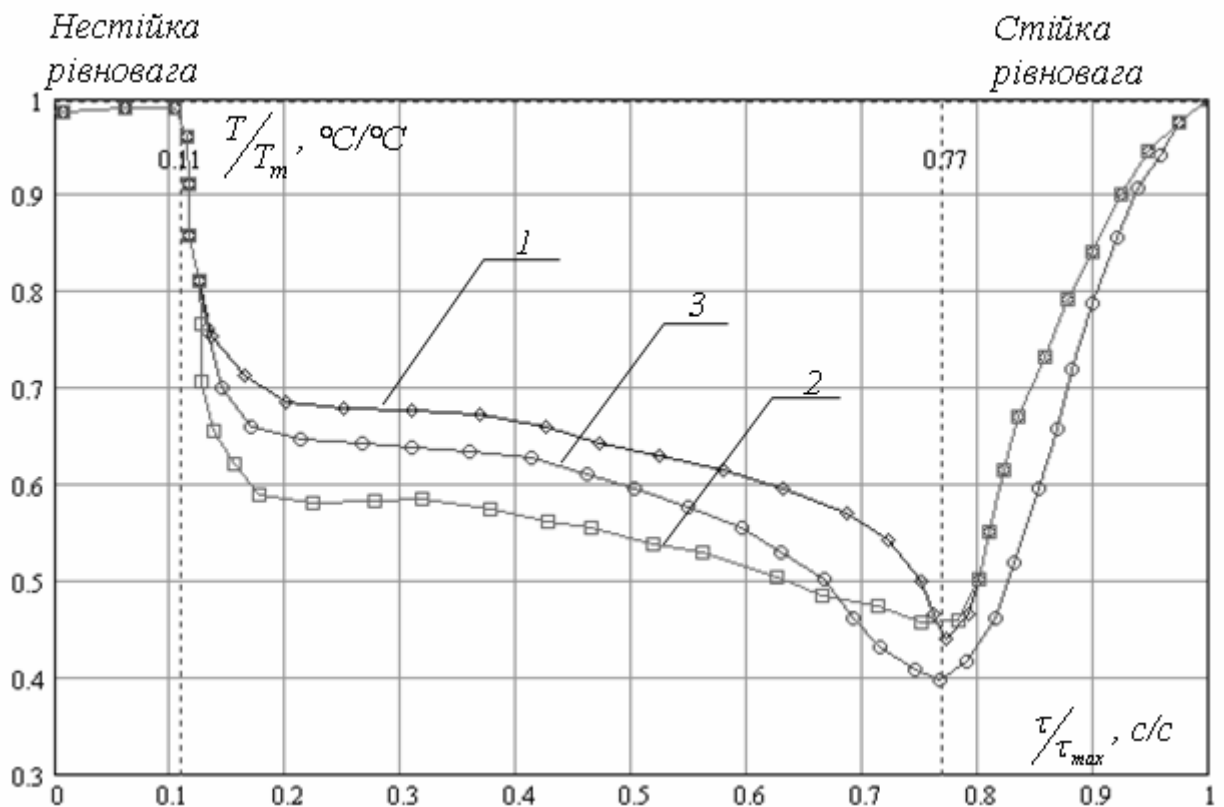


Рисунок 2.5 – Кінетика температури тіла в процесі ІнтМО, отримана від термопар:  
1 – I; 2 – II; 3 – III

«Запуску» ефекту ІнтМО на термограмі відповідає падіння температури тіла, відокремлене першою пунктирною лінією на рис. 2.5. Після видалення рідкої фази всередині термостата (мінімум кінетики температури – друга пунктирна лінія), температура тіла починає знову наближатися до температури термостата. Ефект ІнтМО закінчується за умови, коли маса рідини в термостаті буде дорівнювати нулю:  $m_p=0$  – система досягла рівноваги.

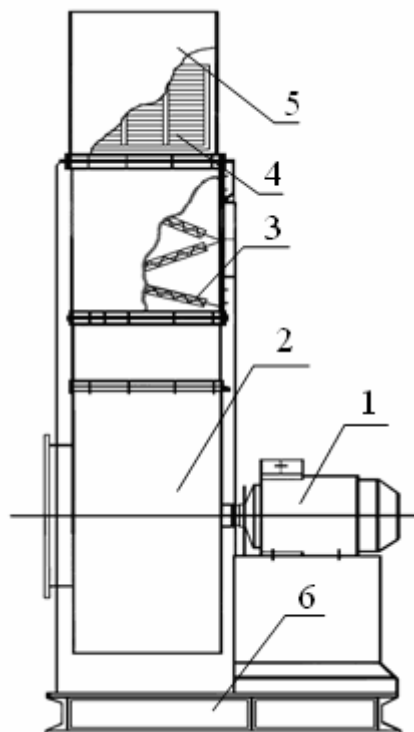
Матеріалом для досліджень ефекту ІнтМО була харчова сировина тваринного та рослинного походження, для якої ТМО є частиною технологічної обробки. Попередніми дослідженнями ІнтМО [69, 70, 138-144] та дослідженнями проведеними в даній роботі доведено, що характер ефекту ІнтМО визначається не стільки властивостями сировини, яка знаходиться у внутрішньому виділеному об'ємі термостата, а тим наскільки повно реалізуються необхідні та достатні умови для організації даного ефекту. При цьому властивості сировини визначають внутрішній ТМО термостата, який визначається, у тому числі, властивостями рідини переходити у газовий стан. Виходячи з цього, дослідження проводились також на модельних КПТ та ККПТ, в якості яких використовувались губка з кукурудзяного та картопляного крохмалю (ККПТ), деревна тирса (ККПТ), синтетична та вовняна повсть (КПТ). Як рідина у внутрішньому об'ємі термостата використовувались рідини з різною температурою кипіння, теплоємністю, леткістю, а саме: етиловий спирт, вода, суміш спирту та води.

Матеріалом, із якого виконували КПТ для обтюратора, були: синтетична та вовняна повсть, фільтрувальна латунна сітка (діаметр отвору від 0,5 до 0,03 мм), фільтрувальна сітка із нержавіючої сталі (діаметр отвору від 0,5 до 0,05 мм). Окремим випадком утворення КПТ обтюратора є його самовільне утворення із сировини, що підлягає обробці. Вибір матеріалу КПТ обтюратора обумовлений операцією, яка виконується, та необхідністю й простотою його санітарної обробки.

### 2.3 Технічне забезпечення досліджень

Для дослідження ІнТМО використовувались установки, конструкція яких розроблена на кафедрі фізико-математичних та інженерно-технічних дисциплін ХДУХТ (рис. 2.6 та рис. 2.7).

Принцип роботи установки з рис. 2.6 полягає в наступному. Повітря оточуючого середовища подається відцентровим вентилятором 2 у блок калориферів 3, де нагрівається до заданої температури, після чого воно надходить у камеру 5. У середині камери встановлюється ТМО-модуль 4 з вологим ККПТ. Для даної установки повітря оточуючого середовища виконує дві функції. Перша функція полягає у забезпеченні термостатування модуля 4 з вологим ККПТ. Друга функція – повітря, що обдуває ТМО-модуль, є середовищем, яке створює в обтюраторі флуктуацію концентрації частинок суцільного газового середовища.



**Рисунок 2.6 – Схема експериментальної установки для дослідження ІнТМО:**  
 1 – електродвигун; 2 – вентилятор; 3 – електрокалорифер; 4 – ТМО-модуль з вологим ККПТ; 5 – робоча ТМО камера; 6 – основа



Принцип роботи установки для дослідження ІнТМО, наведеної на рис. 2.7, наступний. Повітря, що нагнітається компресором, надходить до ресивера, після якого проходить через електрокалорифер. За необхідності електрокалорифер підключають для підігрівання повітря до визначеної температури. Далі повітря через трубки обдуває обтюратори ТМО-модуля з вологим ККПТ.

Термостатування модуля здійснюється нагрівальними поверхнями, потужність на яких регулюється автотрансформатором, а її величина контролюється амперметром і вольтметром. Для даної установки існує можливість використовувати модулі різних конструкцій. Загальний вигляд використовуваного модуля наведений на рис. 2.4. Вид ТМО-модулів, які відрізняються за конструкцією від модуля з рис. 2.4, будуть наведені безпосередньо перед представленням результатів відповідних експериментів.

Радіоспектроскопічні дослідження стану й властивостей вологи різних ККПТ, проводилися на ЕПР-спектрометрі РЕ-1301. Спектрометр ЕПР являє собою пристрій для виявлення магнітних дипольних переходів. Монохроматичне електромагнітне випромінювання подають на зразок і спостерігають за змінами інтенсивності випромінювання, що пройшло через зразок за допомогою відповідного детектора. Поглинання буде відбуватися тільки в тому випадку, якщо енергія кванта падаючого випромінювання дорівнює відстані між рівнями енергії [161, 162].

Блок-схема спектрометра наведена на рис. 2.8, де показане також призначення окремих груп пристроїв, що його складають.

Група, названа «Блок джерела НВЧ-випромінювання», включає пристрої, що керують частотою й інтенсивністю мікрохвильового пучка або вимірюють ці параметри. «Система резонатора» складається із пристроїв, призначених для розміщення зразка, а також для напрямку й контролю мікрохвильового пучка, що падає на зразок, і виходить із резонатора.

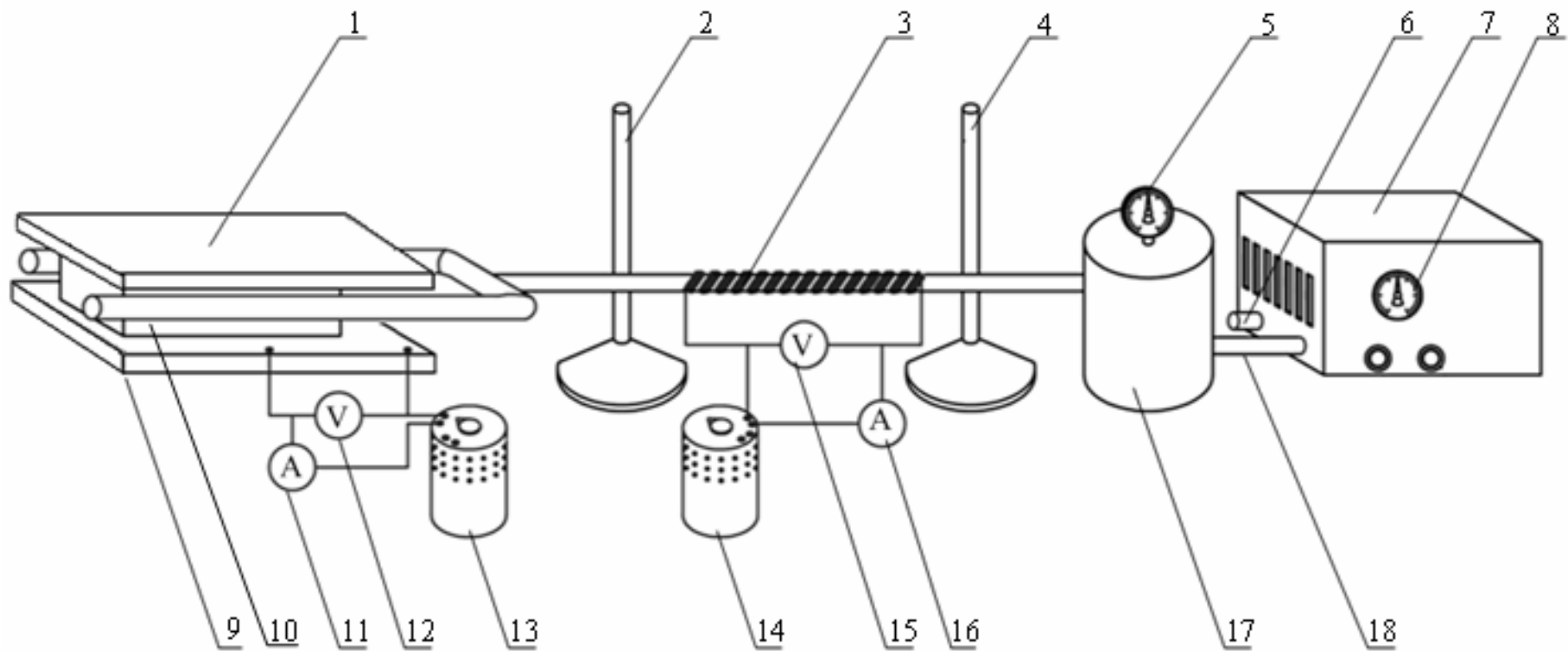


Рисунок 2.7 – Схема експериментального стенду для дослідження ІнТМО: 1, 9 – нагрівальні поверхні; 2, 4 – штативи; 3 – електрокалорифер для нагрівання повітря; 5, 8 – манометри; 6, 18 – вхідний та вихідний патрубок компресора, відповідно; 7 – компресор; 10 – ємність з вологим ККПТ; 11, 16 – амперметри; 12, 15 – вольтметри; 13, 14 – автотрансформатори; 17 – ресивер

«Системи детектування й модуляції» приймають, підсилюють і реєструють сигнал. «Система магніту» забезпечує стабільне однорідне магнітне поле довільної інтенсивності, що лінійно змінюється.

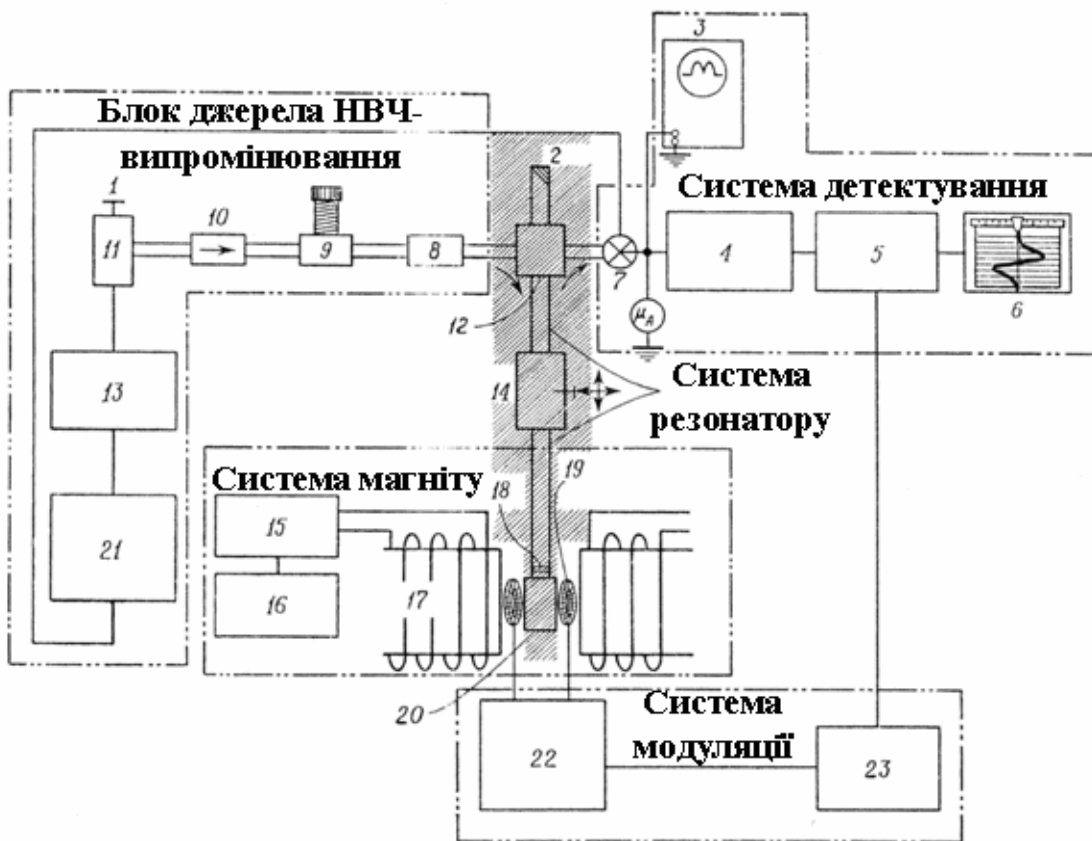
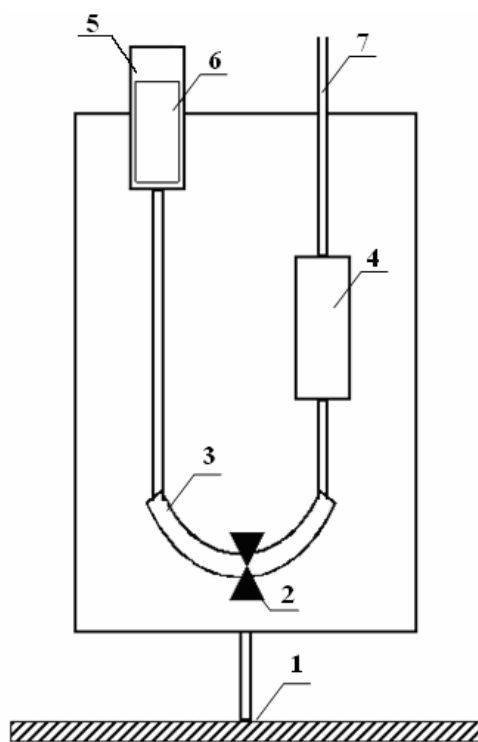


Рисунок 2.8 – Блок-схема ЕПР-спектрометру: 1 – регулювання клістрону; 2 – кінцеве навантаження; 3 – осцилограф; 4 – підсилювач сигналу; 5 – детектор сигналу; 6 – самопис; 7 – кристалічний детектор; 8 – атенюатор; 9 – хвилемір; 10 – вентиль; 11 – клістрон; 12 – циркулятор; 13 – блок живлення клістрона; 14 – узгоджувач; 15 – джерело живлення магніту; 16 – блок сканування поля; 17 – електромагніт; 18 – отвір зв'язку; 19 – котушка модуляції; 20 – резонатор; 21 – автоматичне підстроювання частоти; 22 – підсилювач; 23 – ВЧ-генератор

Дослідження кінетики набухання та відновлюваності сировини та сушеної продукції проводили об'ємним методом на приладі Догадкіна. Схема приладу показана на рис. 2.9.

На штативі 1 закріплені скляні посудини 4 та 5, які з'єднані гумовою трубкою 3. Сполучення між посудинами перекривається затискачем 2. У верхній частині посудини 4 розташована вимірювальна трубка 7. Досліджуваний зразок розміщується в ємності 6, виконаній із металевої сітки. Широка частина посудини 4 служить як розширювач, звідки змочуюча досліджуваний продукт рідина перетікає під дією надлишкового тиску до зразка. Вимірювальна трубка 7 попередньо тарується й поруч із нею на штативі закріплюється вимірювальна шкала приладу. Для відліку тривалості змочування досліджуваного продукту використовувався електронний секундомір.

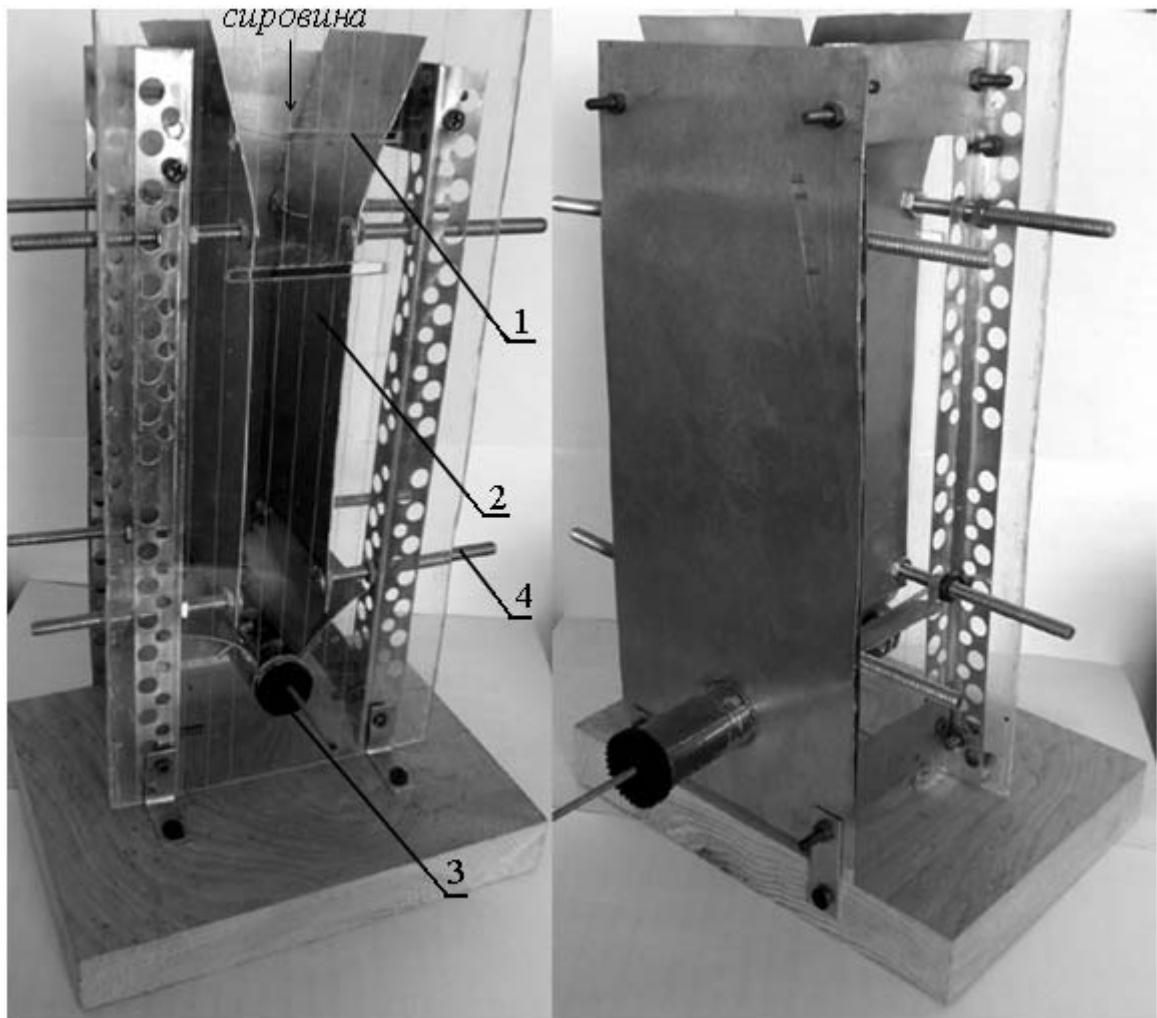


**Рисунок 2.9 – Прилад Догадкіна: 1 – штатив; 2 – затискач; 3 – гумова трубка; 4, 5 – скляні посудини; 6 – вимірювальна ємність; 7 – вимірювальна трубка**

Кінетика набухання або відновлюваності досліджуваних зразків отримувалась наступним чином. Зразок визначеної маси ( $\approx 10$  г) розміщують у вимірювальну ємність 6. Обводнюють ємність з матеріалом у посудині 5 приладу за рахунок подачі повітря під надлишковим тиском крізь

вимірювальну трубку 7. Коли рівень води в посудині 5 буде вище висоти ємності, перекривають з'єднувальну трубку 3 затискачем 2.

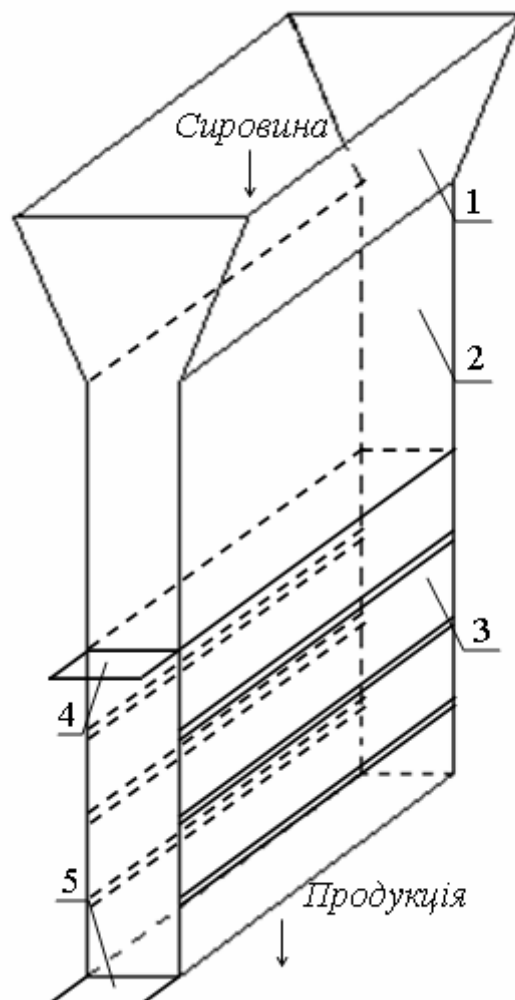
Через визначений інтервал часу (1...5 хв.) знімають затискач і, після того як рівень водяного стовпчика у вимірювальній трубці установиться, записують значення його висоти. Повторюють дані операції до тих пір, поки висота водяного стовпчика у вимірювальній трубці не стане постійною. Далі розраховують відношення маси поглинутої води до маси сухих речовин зразка для кожної точки виміру і будують зміну розрахованого вологовмісту з часом, тобто кінетику набухання сировини або кінетику відновлюваності сушеної продукції.



**Рисунок 2.10 – Установа для дослідження плинущини вологості сировини у трубці прямокутного перерізу: 1 – завантажувальний бункер; 2 – ТМО-модуль; 3 – шнек; 4 – напрямні**

Для візуального дослідження плинусировини у внутрішній частині термостата використовувалась установка, наведена на рис. 2.10. В даній установці одна із стінок виконана зі скла. Стінки, площини яких перпендикулярні до стінки із скла, зроблені таким чином, що існує можливість змінювати відстань між ними.

Під час визначення раціональних параметрів гідротермічної обробки круп в термостаті з використанням ІнТМО, таких як тривалість проварювання та тривалість зневоднення, температура термостата, використовувалась установка наведена на рис. 2.11.



**Рисунок 2.11 – Установка для визначення раціональних параметрів гідротермічної обробки круп в термостаті з ІнТМО: 1 – завантажувальний бункер; 2 – частина без обтюраторів; 3 – частина з обтюраторами; 4, 5 – заслінки**

Установка являє собою трубу прямокутного перерізу, яка виконана із паронепроникного матеріалу, розділену на дві частини: без обтюраторів та з обтюраторами. Частини одна від іншої відділені заслінками.

Сировина крізь завантажувальний бункер засипається в першу частину установки без обтюраторів, де підігрівається до температури проварювання та проварюється до напівготовності. Після цього відкривається заслінка 1 і проварена сировина засипається під дією сили тяжіння в другу частину з обтюраторами. На місце провареної сировини із завантажувального бункера, також під дією сили тяжіння, засипається непроварена сировина, заслінку 1 після цього закривають. У частині установки з зазорами сировина зневоднюється з використанням ІнТМО. Для вивантаження готової продукції відкривають заслінку 2. Після спорожнення частини установки з обтюраторами заслінку 2 закривають, а заслінку 1 відкривають. Цикл повторюється.

## **2.4 Методики дослідження**

### **2.4.1 Методики дослідження індукованого тепломасообміну:**

кінетика вологовмісту, кінетика температури

Температура всередині термостата визначалась за допомогою термопар. Сигнал від термопар реєструвався у вигляді текстового файлу за допомогою ПК. Після цього отриманий файл зчитували у пакеті програм MathCad та будували відповідні залежності [163-165]. Термопари розміщували в обтюратор, тверду, рідку та газову фази всередині термостата. Безпосередньо перед представленням результатів досліджень наведені рисунки зі схемами розміщення термопар в термостаті.

Як було відмічено вище, на кінетиці температури ІнТМО можуть бути виділені характерні ділянки, які свідчать про «запуск» або «зрив» ефекту, його закінчення та характер його «протікання». Оскільки ефект ІнТМО

закінчується, якщо в термостаті відсутня рідка фаза, то стежити за характером його перебігу можна за кінетикою маси рідкої фази всередині термостата.

Кінетику вмісту рідини, тобто його зміну з часом, вивчали наступним чином. Періодично зважуючи термостат із вологим ККПТ під час ІнтМО, розраховували (за масою сухих речовин ККПТ) поточний вологовміст за формулою:

$$w = \frac{m_p}{m_{c.p.}} \cdot 100\% = \left( \frac{m_{nom}}{m_c} - 1 \right) \cdot 100\%, \quad (2.30)$$

де  $m_{nom}$ ,  $m_{c.p.}$ ,  $m_p$  – поточне значення маси зразка, маса сухих речовин, маса рідкої фази в зразку, відповідно, *кг/кг сух. реч.*

#### 2.4.2 Методика дослідження стану вологи в колоїдному капілярно-пористому тілі методом ЕПР-спінових міток

Одним із молекулярно-кінетичних методів дослідження системної води дисперсних систем є метод електронного парамагнітного резонансу (ЕПР). Широко відоме застосування методу спектроскопії ЕПР у різних областях хімії, фізики, біології та медицини, а доповнення його методом спінових міток, тобто введенням парамагнітних зондів у досліджувану непарамагнітну систему, істотно розширило можливості методу завдяки унікальній чутливості спінової мітки до фізичних умов її молекулярного оточення. Таким чином, даний метод можна використати для дослідження вологи в області моно- та полімолекулярної сорбції. Попередніми дослідженнями встановлено [142, 145], що метод ЕПР-спінових міток дає можливість якісно оцінити види вологи, яку утримує вологий матеріал, але кількісної оцінки отриманих результатів проведено не було.



Спіноюю міткою, яку використано в роботі, є один із перших варіантів парамагнітного зонда – легкодоступний іон перехідного металу  $Mn^{+2}$  [161]. Для реєстрації спектрів ЕПР був застосований радіоспектрометр РЕ1301. Спектри реєструвалися у вигляді першої похідної поглинання НВЧ енергії  $E$  (далі використовується  $I$  – інтенсивність ЕПР-сигналу пронормована на максимальне значення  $I = \frac{E}{E_{max}}$ ) досліджуванним парамагнетиком при скануванні постійного магнітного поля  $H$  [166]. Як предмети дослідження використовувались порошок солі  $MnSO_4$ ; її 5%-розчин; вологе модельне ККПТ (харчова система), де в якості зволожуючої рідини використовувався водний 5%-розчин солі  $MnSO_4$ .

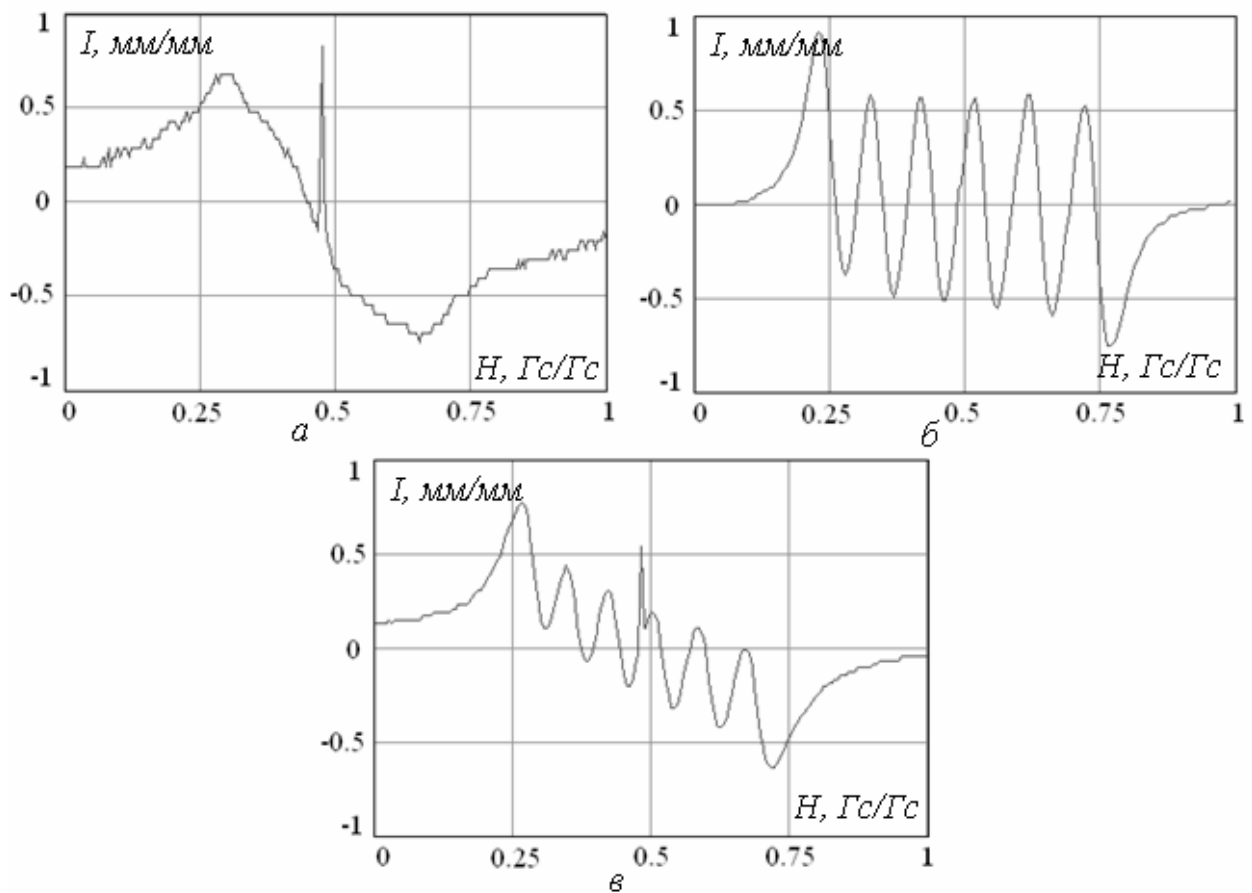


Рисунок 2.12 – Спектри для: *a* – порошку солі  $MnSO_4$ ; *б* – 5%-розчину солі  $MnSO_4$ ; *в* – модельного вологого ККПТ (харчової системи)

Досліджувані модельні ККПТ отримувались із харчової сировини, при цьому підготовка зразків проводилась таким чином, щоб він був максимально однорідним і утримував якомога меншу кількість складових. Надалі вважається, що властивості води модельного ККПТ модулюють властивості води харчового продукту або сировини, які утримують ті ж компоненти, що і модельне ККПТ. Приклади отримуваних спектрів наведені на рис. 2.12.

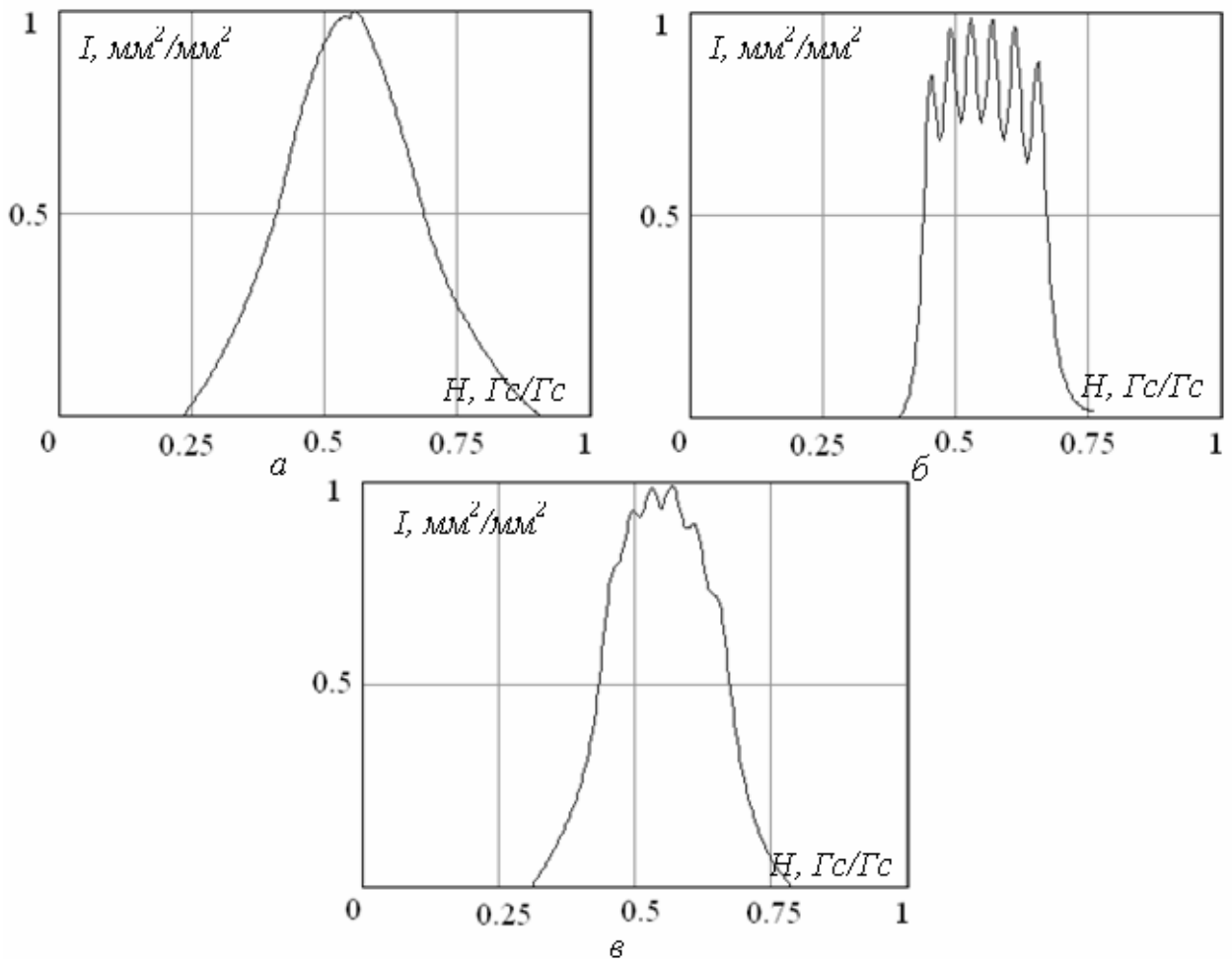
Ідея методу заснована на наступних результатах та припущеннях. Оскільки спектр поглинання НВЧ енергії досліджуваним парамагнетиком реєструється у вигляді першої похідної, то першим кроком є знаходження первісної від нього, яку можна знайти шляхом сумування отриманих експериментальних даних (рис. 2.13). Спектр ЕПР порошку солі  $MnSO_4$  являє собою широку одиночну лінію без надтонкої структури (рис. 2.13 а); спектр її розчину складається з шести піків рівної інтенсивності (рис. 2.13 б); спектр від вологого модельного ККПТ – широка одиночна лінія, на яку накладається розділений спектр із шести піків (рис. 2.13 в).

Виходячи з вигляду сигналу вологого модельного ККПТ, можна припустити, що його спектр складається із двох: широкої одиночної лінії без надтонкої структури та розділеного спектру із шести піків рівної інтенсивності. Причому, площа під спектром, тобто під широкою лінією та під спектром із шести піків, пропорційні кількості резонуючих спінів, а, відповідно, кількості іонів  $Mn^{+2}$ , які мають обмежену рухомість, та іонів  $Mn^{+2}$ , які знаходяться в розчині. По мірі зв'язування води або її видалення розчинність солі зменшується, що приводить до зміщення рівноваги



вліво з утворенням недисоційованих молекул. Це в свою чергу приводить до того, що площа під одиночною лінією збільшується. Ця площа пропорційна числу молекул  $MnSO_4$ . Відповідно, знаючи граничну розчинність солі за

даної температури, є можливість визначити яка частина води від загального її вмісту виконує роль розчинника  $w_{розч}$ .



**Рисунок 2.13 – Інтегровані експериментальні дані для: а – порошку солі  $MnSO_4$ ; б – 5%-розчину солі  $MnSO_4$ ; в – модельного вологого ККПТ (харчової системи)**

Враховуючи, що вклад «рухомої» води в надтонку структуру спектра ЕПР  $Mn^{+2}$  вносять тільки 2...3 прилеглих шари молекул, то за відсутності границь розділу між формами зв'язку води по мірі її видалення із ККПТ слід очікувати отримання лінійної залежності  $w_{розч}$  від загального вмісту води. Якщо існує границя розділу між формами зв'язку води – то залежність  $w_{розч}$  від загального вмісту води буде мати нелінійний характер або стрибкоподібний.

З теорії методу ЕПР [161, 162], відомо, що отримані спектри можуть бути описані рівняннями Гауса (2.31) та Лоренца (2.32), які мають вигляд:

$$I_G = I_0^G \cdot \exp\left(-\frac{(H - H_0)^2}{\Delta H_G^2}\right), \quad (2.31)$$

$$I_L = I_0^L \cdot \left(1 + \frac{(H - H_0)^2}{\Delta H_L^2}\right)^{-1}, \quad (2.32)$$

де  $I_G, I_L$  – поточне значення інтенсивності спектру, відн.од. ( $\text{мм}^2/\text{мм}^2$ );

$I_0^G, I_0^L$  – максимальне значення інтенсивності спектру, відн.од. ( $\text{мм}^2/\text{мм}^2$ );

$H, H_0$  – поточне значення напруженості магнітного поля та значення напруженості, за якої спектр має максимум, Гс;

$\Delta H_G^2, \Delta H_L^2$  – ширина лінії, Гс.

Виходячи з цього, наступним кроком розробленої методики аналізу ЕПР-спектрів є знаходження основних параметрів досліджуваних ліній (спектрів порошку солі  $MnSO_4$  та її розчину), а саме: інтенсивності ( $I_0$ ), значення напруженості магнітного поля за якого спостерігається максимум лінії поглинання ( $H_0$ ), ширини лінії ( $\Delta H$ ). Функція (2.33), що описує спектр порошку солі  $MnSO_4$ , складається з однієї функції виду (2.31) або (2.32) (рис. 2.14 а), а функція (2.34) для її розчину – із шести, кожна з яких має свою величину  $H_0$  (рис. 2.14 б):

$$f_{1p}(H, I_0^{1p}) = I_0^{1p} \cdot e^{-\frac{(H - H_0^{1p})^2}{\Delta H_{1p}^2}},$$

$$f_{1p}(H, I_0^{1p}) = I_0^{1p} \cdot \left(1 + \frac{(H - H_0^{1p})^2}{\Delta H_{1p}^2}\right)^{-1}; \quad (2.33)$$

$$f_{6p}(H, I_0^{6p}) = \sum_{k=1}^6 I_0^{6p} \cdot e^{-\frac{(H - H_{0k}^{6p})^2}{\Delta H_{6p}^2}},$$

$$f_{6p}(H, I_0^{6p}) = \sum_{k=1}^6 I_0^{6p} \cdot \left( 1 + \frac{(H - H_{0k}^{6p})^2}{\Delta H_{6p}^2} \right)^{-1}, \quad (2.34)$$

де індекс  $1p$  для широкої лінії, а  $6p$  – для спектру із 6 піків.

Функція (2.35) для вологого модельного ККПТ знаходиться як сума функцій для порошку солі  $MnSO_4$  та її розчину (рис. 2.14 в):

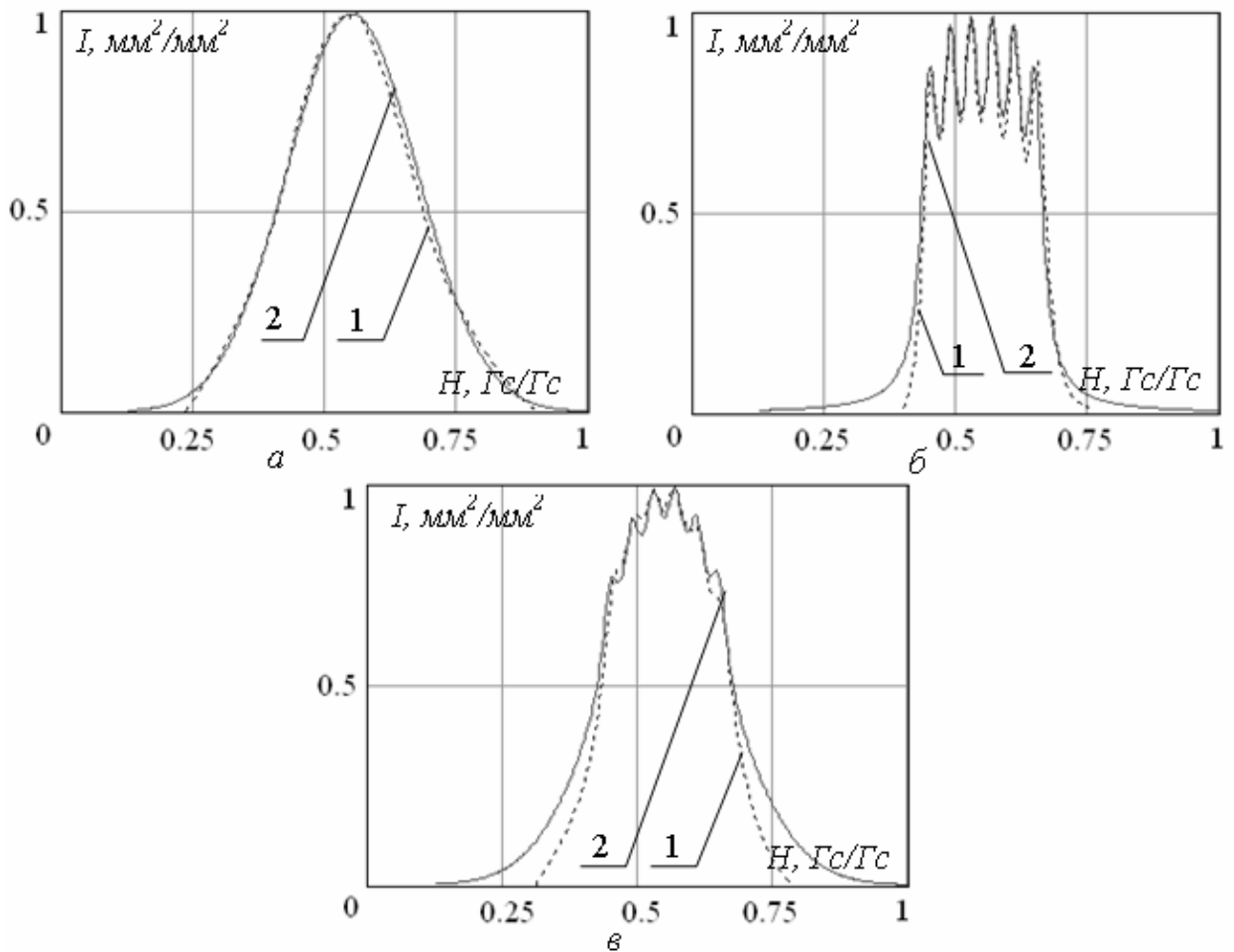
$$f_{ККРТ}(H, I_0^{1p}, I_0^{6p}) = f_{1p}(H, I_0^{1p}) + f_{6p}(H, I_0^{6p}). \quad (2.35)$$

Апроксимація обраною функцією отриманих експериментальних даних для ККПТ проводиться шляхом варіювання значеннями амплітуд вихідних функцій  $I_0^{1p}$  та  $I_0^{6p}$ . Визначені амплітуди використовуються для знаходження площ під функцією, що складається із одиночної лінії, та під функцією із шести піків. Площа під спектром розраховується як інтеграл від аналітичних функцій у нескінченних границях:

$$S_{крист} = \int_{-\infty}^{+\infty} f_{1p}(H, I_0^{1p}) dH, \quad (2.36)$$

$$S_{розч} = \int_{-\infty}^{+\infty} f_{6p}(H, I_0^{6p}) dH. \quad (2.37)$$

Площа  $S_{крист}$  пропорційна кількості резонуючих спінів електронів  $Mn^{+2}$  солі  $MnSO_4$ , яка знаходиться в кристалічному стані, а, відповідно, і масі солі яка випала в осад. Площа  $S_{розч}$  пропорційна кількості спінів електронів іонів  $Mn^{+2}$ , що знаходяться в розчині, а, відповідно, і масі води, яка проявляє себе як розчинник.



**Рисунок 2.14 – Інтегровані експериментальні дані (1) та апроксимаційні функції (2) для: а – порошку солі  $MnSO_4$ ; б – 5%-розчину солі  $MnSO_4$ ; в – модельного вологого ККПТ (харчової системи)**

Якщо модельне ККПТ, сигнал ЕПР якого описується функцією (2.35), зневоднювати, то внаслідок зменшення кількості води, площа  $S_{\text{крист}}$  буде збільшуватися, а  $S_{\text{розч}}$  – зменшуватися. Пояснюється це тим, що кількість води, яка може бути розчинником, зменшується, а кількість солі  $MnSO_4$ , яка випала в осад – збільшується.

По мірі зневоднення сигнал із шести піків перетвориться в сигнал, що представляє собою широкую лінію.

Таким чином, розроблену методику [167] (Додаток А.1) можна використовувати для дослідження границь розділу між формами зв'язку вологи, а саме дослідити чи енергія зв'язку для різних форм зв'язку вологи

змінюється неперервно, чи дискретно, а також дослідити кінетику видалення води із ККПТ на молекулярному рівні [168-171].

## 2.5. Математична обробка результатів експериментів

В процесі проведення досліджень отримана велика кількість експериментальних значень різних параметрів. Виходячи з поставлених завдань дослідження, була проведена їх математична обробка з метою перевірки ступеня ймовірності отриманих даних, встановлення певних зв'язків між ними, подання результатів обробки в графічному виді й т.ін. Обробка проводилась за допомогою пакета програм Mathcad, що містить у собі широкий спектр процедур для рішення завдань статистичного аналізу, інтерполяції, згладжування, регресійного та кореляційного аналізу, а також можливості подання результатів обробки в різних інтерпретаціях графіки [163-165].

Математична обробка проводилась в наступній послідовності:

- попередній аналіз результатів експериментів;
- кореляційний аналіз;
- регресійний аналіз.

Абсолютна похибка прямих вимірів визначалася за формулою

$$\Delta x = \frac{t_{cn}}{\sqrt{N-1}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\bar{x} - x_i)^2}{N}} = \frac{t_{cn}}{\sqrt{N-1}} \cdot \sigma, \quad (2.38)$$

де  $t_{cn}$  – коефіцієнт Стюдента;

$\bar{x}$  – середнє арифметичне значення, що визначається за формулою:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i; \quad (2.39)$$

де  $N$  – кількість експериментальних точок;

$\sigma$  – стандартне відхилення.

Обробка термограм проводилася шляхом дискретизації отриманої термограми кроком від 1 до 5 хв. із наступним поліноміальним згладжуванням апроксимуючим поліномом ступеня  $n$

$$y_i = \sum_{n=0}^P a_n x_i^n = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_n x^n. \quad (2.40)$$

Оптимальний ступінь полінома визначався мінімумом співвідношення

$$\sigma_{\min}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \left( y_i - \sum_{n=0}^P a_n x_i^n \right)^2}{N - P - 1}. \quad (2.41)$$

Mathcad дозволяє визначити коефіцієнти апроксимуючого полінома, що дає можливість диференціювання та інтегрування отриманої функції простими операторами:

$$Dif(x) = \frac{d}{dx} f(x), \quad (2.42)$$

$$Int(x) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx, \quad (2.43)$$

де  $f(x) = \sum_{n=0}^P a_n x^n$  – апроксимуючий поліном.

Таким методом визначались, наприклад, критичні точки на отриманих термограмах та площа під кривими.



Під час обробки результатів експериментів проводився кореляційний аналіз. Ступінь кореляції визначалася величиною коефіцієнта значимості  $H$

$$H = |r_{xy}| \sqrt{N-1}, \quad (2.44)$$

де  $r_{xy}$  – коефіцієнт кореляції, що визначається оператором Mathcad

$$r_{xy} = \text{corr}(x, y). \quad (2.45)$$

Якщо величина коефіцієнта значимості  $H > H_{кр}$  (практично  $H_{кр} = 3$ ), то ступінь зв'язку між  $x$  і  $y$  достатньо високий. У цьому випадку проводився підбір регресійного рівняння.

У випадку лінійної регресії використовувалось рівняння

$$y = ax + b, \quad (2.46)$$

де  $a$  і  $b$  – коефіцієнти, що визначають кут нахилу та зсув по осі ординат лінії регресії, які визначаються процедурами Mathcad:

$$a = \text{slope}(Vx, Vy), \quad (2.47)$$

$$b = \text{intercept}(Vx, Vy), \quad (2.48)$$

де  $Vx$  і  $Vy$  – вектори експериментальних даних.

Для більш складних залежностей використовувався нелінійний регресійний аналіз, який дозволяє представити емпіричне рівняння у вигляді довільної функції, параметри якої визначаються процедурою Mathcad

$$P = \text{genfit}(Vx, Vy, Vg, F), \quad (2.49)$$

де  $P$  – вектор, що містить  $n$  параметрів, які забезпечують найкраще наближення даних з  $Vx$  і  $Vy$  функцією  $f$

$$f(x) = F(x, P). \quad (2.50)$$

За цією методикою підбиралися параметри емпіричної формули для кінетики вологовмісту та кінетики температури. Формули мають вигляд:

$$f(x) = e^{\sum_{n=0}^{P-1} a_n x^{n+1}}, \quad (2.51)$$

$$f(x) = x \cdot e^{\sum_{n=0}^{P-1} a_n x^{n+1}}. \quad (2.52)$$

Деякі програми обробки експериментальних даних пакетом Mathcad наведені в додатках.

## Висновки до розділу 2

1. Розкрито суть ефекту індукованого тепломасообміну (ІнТМО), який спостерігається в термостаті і полягає в переході системи від нестійкої рівноваги до стійкої, який супроводжується розсіюванням теплоти за рахунок переходу рідкої фази в термостаті у газовий стан. Відмічено, що процес ЗТП-сушіння є окремим випадком більш загального ефекту – ефекту ІнТМО.

2. Визначено, що ефект ІнТМО реалізується в термостаті, всередині якого знаходяться у динамічній рівновазі за даної температури та атмосферного тиску рідина та газ, який є сумішшю повітря та пари рідини. Середовище всередині термостата сполучається з оточуючим середовищем через обтюратор з об'ємом значно меншим за об'єм термостата, при цьому обтюратор повинен бути частиною термостата. Фільтраційні властивості

обтюратора повинні бути такими, щоб всередині термостата існувала динамічна рівновага між складовими, а газове середовище всередині було суцільним за парціальним тиском пари рідини. В обтюраторі повинна виникати флуктуація параметрів суцільного газового середовища, а реакція системи на дані флуктуації полягає у відновленні рівноважного значення параметру, для якого відбулась флуктуація, впродовж часу меншого за тривалість спостереження. Всередині термостата повинна бути наявна рідка фаза, за умови її відсутності ІнТМО не «запускається», а за умови її видалення – закінчується.

3. Сформульовані необхідні та достатні умови для спостереження і регулювання ефекту ІнТМО:

- наявність флуктуацій параметрів газу в об'ємі обтюратора;
- теплоємність термостата повинна бути настільки велика, щоб компенсувати теплоту, витрачену на відновлення кількості пари рідкої фази у суцільному газовому середовищі всередині термостата, яка змінилась в результаті зовнішньої флуктуації;
- ефект спостерігається за кінцевий (лабораторний) проміжок часу;
- флуктуації в об'ємі обтюратора можуть бути просторові і (або) за часом;
- за флуктуації температури на границі розділу «обтюратор – навколишнє середовище», обтюратор повинен мати здатність «виносу» рідини в навколишнє середовище
- температура термостата може бути більшою за температуру кипіння рідини, при цьому температура рідини за ефекту ІнТМО знаходиться всередині граничного циклу.

4. Складено балансні рівняння ефекту ІнТМО для випадку флуктуації концентрації частинок пари рідини в суцільний газівому середовищі всередині термостата за рахунок флуктуацій концентрації частинок в об'ємі обтюратора, що створюються зовнішнім газівим середовищем. Отримано рівняння ефекту ІнТМО, за яким потік маси із термостата індукує потік

теплоти до його внутрішнього середовища. При цьому визначено, коефіцієнт пропорційності між потоками обумовлюється фізичними властивостями рідини, способом заповнення внутрішнього об'єму термостата і конструкцією обтюратора

5. Сформульована наукова концепція роботи, яка полягає в наступному: теорія – індукування тепломасообміну в термостаті з обтюратором флуктуаціями параметрів газу в обтюраторі сприятиме ефективному випаровуванню рідини в термостаті; техніка – термостат з обтюратором, що містить рідину та (або) вологе колоїдне капілярно-пористе тіло (ККПТ), являє собою керований тепломасообмінний апарат для харчової промисловості

6. Розроблена методика дослідження стану вологи в ККПТ методом ЕПР-спінових міток. Методика надає можливість дослідження границь розділу між формами зв'язку вологи та кінетики видалення води із ККПТ на молекулярному рівні.

7. Наведено опис та розроблені експериментальні стенди для дослідження ІнТМО.

8. Розроблені програми для математичної обробки та графічного представлення результатів дослідження з використанням пакету програм MathCad.

### РОЗДІЛ 3

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТУ ІДУКОВАНОГО ТЕПЛОМАСООБМІНУ

### 3.1 Аналіз процесу тепломасообміну в термостаті методом фазового простору

Одним із способів якісного аналізу стану системи (механічної, хімічної, термодинамічної і т. ін.) є метод фазового простору [172-175]. Полягає він у наступному. На координатних осях відкладають поточні значення змінних стану аналізованої динамічної системи. Їх зміні з часом відповідають певні криві – фазові траєкторії в просторі змінних параметрів стану. Сукупність фазових траєкторій динамічної системи складає її фазовий портрет. Фазовий портрет представляє вичерпний опис всіх її можливих режимів. Однак, в загальному випадку отримання такого повного опису станів динамічної системи представляє складне завдання, оскільки фазові траєкторії є кривими в багатовимірному просторі [175].

Скористаємося методом фазового простору для аналізу стану динамічної системи, в якій реалізується ІнТМО [176, 177]. Під динамічною системою розуміється термостат, у внутрішньому виділеному об'ємі якого знаходиться три фази тверда (ККПТ) рідка та газова. Газове середовище у внутрішньому виділеному об'ємі термостата сполучається з оточуючим термостат середовищем через обтюратор.

Однією із необхідних умов для запуску ефекту ІнТМО, як відмічено у другому розділі, є те, що величина енергії активації  $E_A$  повинна бути менша за баластну енергію  $E_B$ , необхідну для забезпечення фазового переходу. Тобто, якщо  $E_A < E_B$ , то можна вважати, що «запуск» ІнТМО відбувся. Енергією активації, у випадку що розглядається, є робота потоку повітря, що рухається відносно обтюратора, яка визначається кінетичною та потенціальною енергією потоку. Таким чином, критерієм «запуску» ефекту

ІнТМО є значення величини енергії активації  $E_A$  по відношенню до значення величини баластної енергії  $E_B$ .

Ефект ІнТМО, як відмічено у розділі 2, полягає у переході системи від нестійкої рівноваги до стійкої, який супроводжується видаленням рідкої фази з об'єму термостата. Прагнення до рівноваги у випадку, що розглядається, по суті є явищем нагрівання системи зі змінною масою за рахунок випаровування. Тобто «стік» теплоти організовується переходом рідини у газовий стан, а «притік» теплоти забезпечується стінками термостата. Дані умови, як відмічено раніше, є одними із необхідних для організації ефекту ІнТМО умов. Хоча теплота не являється параметром стану, але її потік обумовлений різницею температур. Таким чином, можна вважати правомірним використання температури  $T$ , як параметру та однієї із узагальнених координат.

На рис. 3.1 наведено зміну температури ККПТ зі зміною вологовмісту, отримані під час можливих варіантів протікання ТМО в термостаті. Зміна температури ККПТ всередині термостата зі зміною вологовмісту даного ККПТ побудована у безрозмірних координатах. Під безрозмірними координатами розуміється температура, пронормована на температуру термостата, та вологовміст ККПТ всередині термостата, пронормований на початкове значення.

Необхідно відмітити, що за характером зміни температури ККПТ зі зміною його вологовмісту є можливість ідентифікувати «запуск» або «зрив» ефекту ІнТМО, а також аналізувати характер його протікання. Зміна знаку прирощення температури на негативний, свідчить про «запуск» ефекту ІнТМО. Повторна зміна знаку прирощення температури, свідчить або про «зрив» ІнТМО, або про його закінчення.

Так на рис. 3.1 лінії 1 та 2 є характерними для процесу ТМО за відсутності «запуску» ІнТМО, лінія 3 отримана саме для ефекту ІнТМО, а лінії 4 та 5 отримані під час «зриву» ІнТМО.

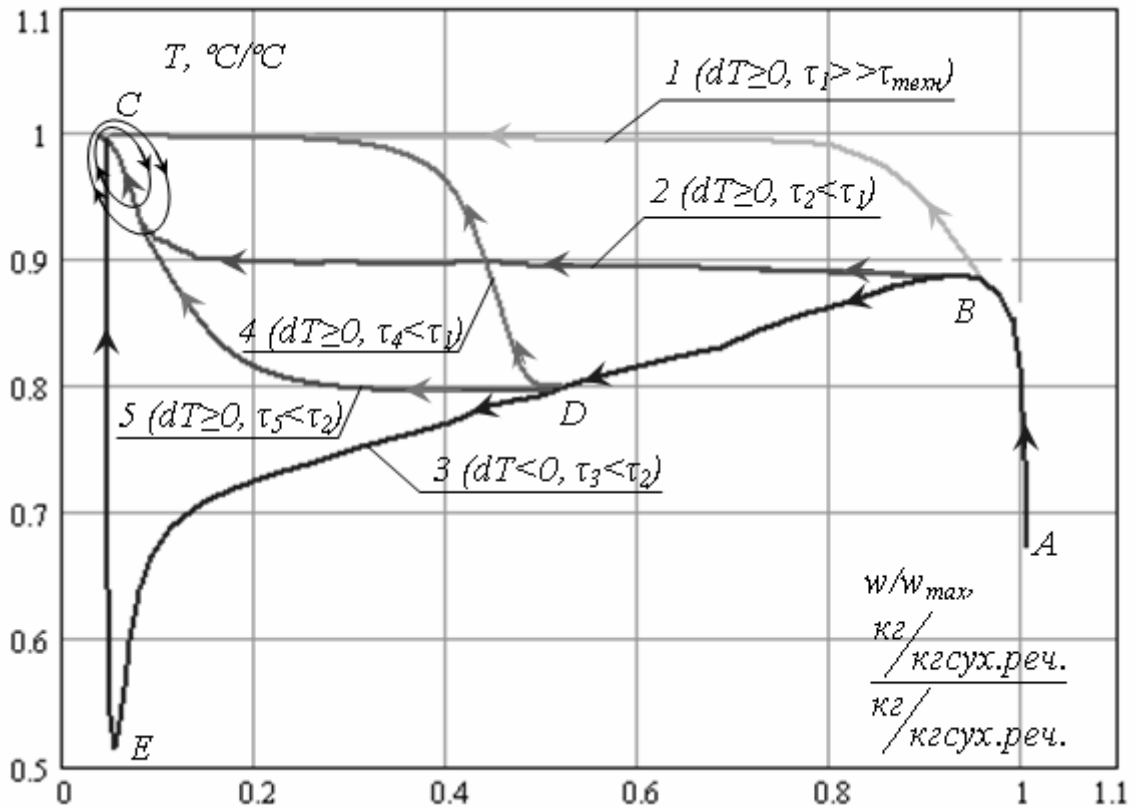


Рисунок 3.1 – Температура ККПТ від вологовмісту за різної організації тепломасообміну в термостаті: 1, 2 – ТМО з  $E_A \geq E_B$ ; 3 – ІнТМО ( $E_A < E_B$ ); 4, 5 – зрив ІнТМО з трансформацією у ТМО з  $E_A \geq E_B$

Другою узагальненою координатою є парціальний тиск пари рідини у внутрішньому газовому середовищі термостата. При цьому слід вважати у відповідності до феноменологічної гіпотези ефекту ІнТМО (розд. 2.1), оскільки суцільне газове середовище знаходиться всередині термостата в «затиснутих» умовах, то парціальний тиск пари рідини в ньому асимптотично прагне до тиску насиченої пари рідини за даної температури.

Третя узагальнена координата обрана виходячи із наступних міркувань. Запишемо систему із двох нелінійних кінетичних рівнянь з двома змінними:

$$C_{\text{сум}} \frac{dT}{d\tau} = F_T(T, w_{\text{вун}}), \quad (3.1)$$

$$r \frac{dw_{\text{вун}}}{d\tau} = F_w(T, w_{\text{вун}}), \quad (3.2)$$

де  $C_{сист}$  – питома теплоємність системи (на 1 кг сухих речовин тіла),

$$\frac{Дж}{К \cdot кг\text{ сух.реч.}};$$

$r$  – питома теплота пароутворення,  $\frac{Дж}{кг}$ ;

$w_{вип} = \frac{m_p}{m_{с.р.}}$  – питома кількість рідини, що перейшла у газовий стан (на

1 кг сухих речовин тіла),  $\frac{кг}{кг\text{ сух.реч.}}$ .

Величина  $C_{сист} \frac{dT}{d\tau}$  у (3.1) пропорційна кількості теплової енергії, що надходить до середовища всередині термостата від його стінок за одиницю часу, а функція  $F_T(T, w_{вип})$  визнає математичну залежність даної кількості енергії від поточних температури та вологовмісту. Величина  $r \frac{dw_{вип}}{d\tau}$  у (3.2) пропорційна кількості енергії, яка розсіюється за рахунок фазового переходу I-го роду за одиницю часу, а функція  $F_w(T, w_{вип})$  визнає математичну залежність даної кількості енергії від поточних температури та вологовмісту.

Розділимо перше рівняння системи на друге, отримаємо:

$$\frac{C_{сист} \cdot dT}{r \cdot dw_{вип}} = \frac{F_T(T, w_{вип})}{F_w(T, w_{вип})} = k_{\Psi} \cdot \Psi(T, w_{вип}), \quad (3.3)$$

де  $k_{\Psi}$  – масштабний коефіцієнт, мм/мм.

Відношення (3.3) має сенс як відношення енергії, поглинутої внутрішнім середовищем термостата, до енергії, розсіяної даним середовищем.

Відмінність рівняння (3.3) від критерію Ребіндера полягає у його фізичному сенсі. У критерії Ребіндера за умови не «індукованого», а природного ТМО чисельник прагне до рівноважної температури по закону

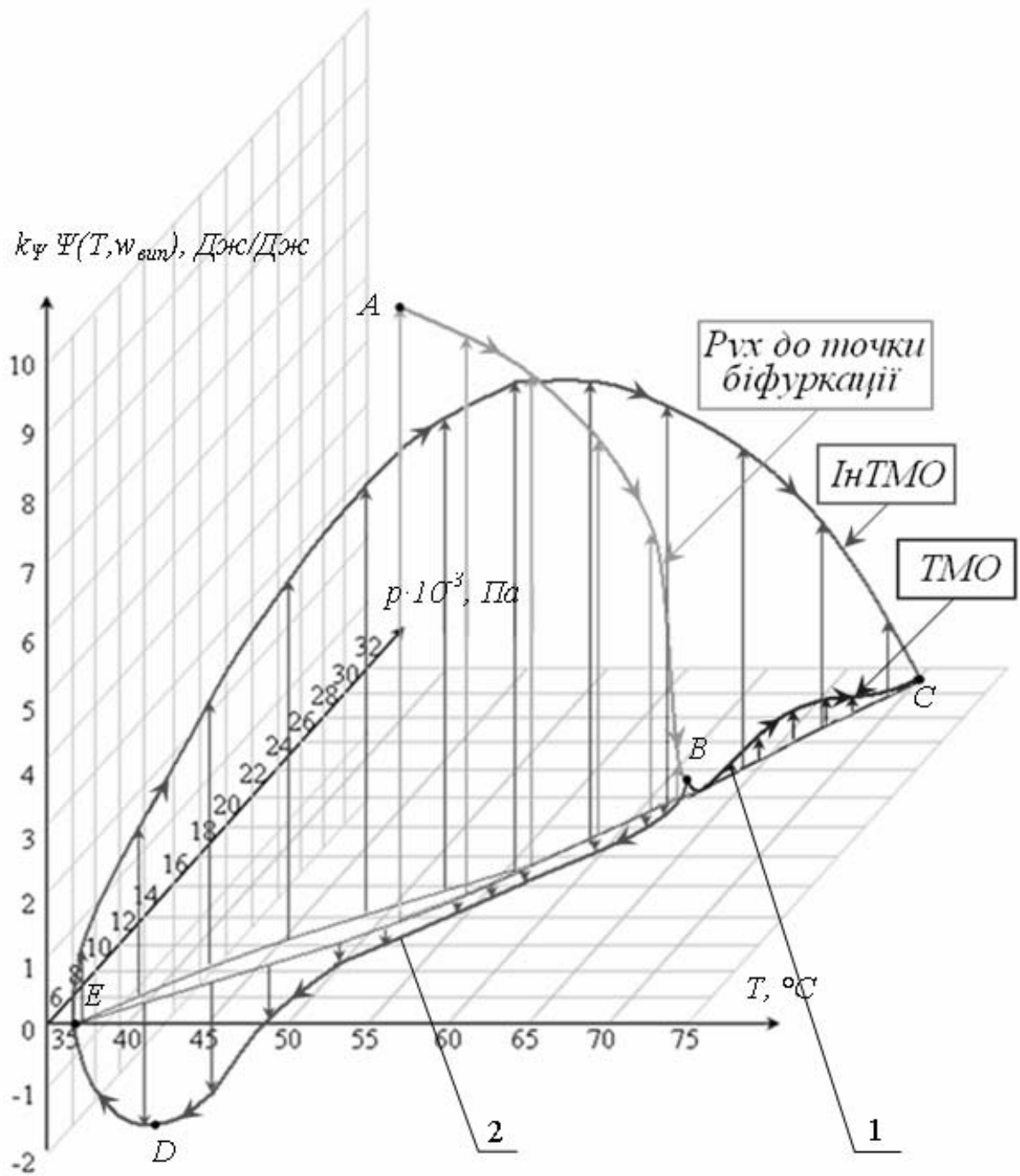


теплопровідності, а знаменник – по закону Дальтона. У випадку ІнТМО закони руху до рівноваги зберігають той же вигляд, але вони «вмикаються» за рахунок  $E_A$  – енергії потоку повітря, що рухається відносно обтюратора. Оскільки ефект ІнТМО має «запуск», «протікання», «блокування», «зрив», то фазовий портрет буде обмежуватися деякою універсальною функцією не стільки обумовленою властивостями сировини утримувати рідину, що характерно для критерію Ребіндера, скільки комплексом внутрішніх та зовнішніх чинників процесу (параметрів порядку, керуючих параметрів). Оскільки ІнТМО є керованим процесом, то (3.3) по суті відображає функцію керованості термостата, як системи.

Рішення рівняння (3.3) дозволяє визначити сімейство фазових траєкторій  $\Psi(T, w_{sun})$ , або так званих інтегральних кривих на фазовій площині.

Обмежимося розглядом фазового простору для ефекту ІнТМО з трьома ступенями вільності. Фазовий простір складають три узагальнені координати – температура  $T$  волого ККПТ у внутрішньому середовищі термостата, парціальний тиск пари рідини внутрішнього газового середовища термостата і функція  $\Psi(T, w_{sun})$ , яка дорівнює відношенню енергії, поглинутої внутрішнім середовищем термостата, до енергії, розсіяної даним середовищем на випаровування. Координата  $\Psi(T, w_{sun})$  обрана безрозмірною з метою отримання зручного масштабу для виявлення характеру поведінки системи та особливих точок фазового портрету, як під час ТМО без енергії активації, так і під час ІнТМО (процесу ТМО з енергією активації).

Фазовий портрет процесу ТМО в термостаті за двома шляхами еволюції системи наведений на рис. 3.2: тепломасообмін без енергії активації – ТМО (шлях 2 з рис. 3.1) та тепломасообмін з енергією активації – ІнТМО (шлях 3 з рис. 3.1) [176, 177].



**Рисунок 3.2 – Фазовий портрет процесу тепломасообміну в термостаті: TMO (1) – тепломасообмін без енергії активації; InTMO (2) – тепломасообмін з енергією активації**

На фазовій площині виділені п'ять точок. Точка А є точкою, положення якої обумовлюється початковими умовами для внутрішнього середовища термостата.

Точки В та С є рівноважними точками. При цьому точка В є точкою динамічної рівноваги, а точка С – стійкої. Точка С є особливою точкою типу центр. Навколо такої точки система описує еліпсоїдальні траєкторії. Положення еліпсоїдальної траєкторії, на якій знаходиться система, обумовлюється значеннями параметрів порядку та керуючих параметрів. Під час знаходження системи на еліпсоїдальній траєкторії можуть відбуватися коливання вологовмісту та температури сировини всередині термостата при асимптотичному наближенні до рівноважних величин. Такі траєкторії нейтрально стійкі: зміни параметрів можуть переводити систему з однієї траєкторії на іншу з новими амплітудою та частотою коливань температури, вологовмісту та швидкості досягнення рівноваги [175].

Як було відмічено раніше, під час ІнтМО мають місце рівноважні стани, при чому їх не менше двох. Перший стан характеризується наявністю в термостаті рідини (для випадку, що розглядається – рідка вода), температура середовища всередині термостата асимптотично прагне до температури стінок термостата. Другий рівноважний стан встановлюється за відсутності рідини всередині термостата та рівновазі даного внутрішнього середовища за температурою зі стінками термостата.

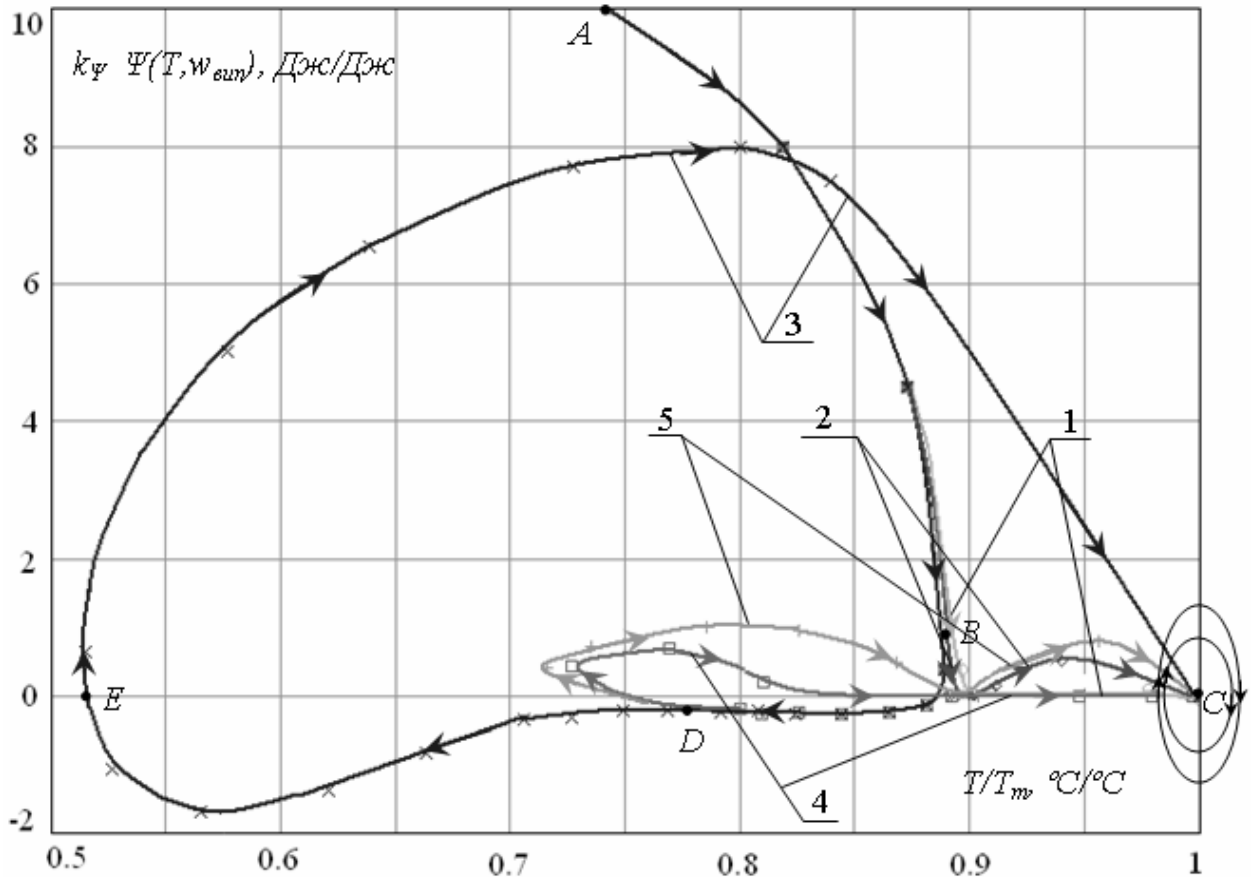
Як поблизу першого стану рівноваги, так і поблизу другого можливе випаровування рідини із сировини та її конденсація за рахунок флуктуацій парціальних тисків пари рідини та градієнту температури, при чому обидва процеси відбуваються всередині термостата, оскільки масообмін з зовнішнім середовищем обмежений фільтраційними властивостями обтюратора. Тобто відбуваються коливання парціального тиску пари рідини (відповідно і вмісту рідини ККПТ всередині термостата за умови її наявності) та температури відносно рівноважних значень за сталого тиску. За цих умов молярний перенос маси не відбувається, оскільки тиск всередині термостата є сталим та дорівнює тиску зовнішнього середовища. Такі коливання температури та парціального тиску пари рідини по всьому об'єму всередині термостата характерні лише для ІнтМО, оскільки, наприклад, для масообміну між

вологим ККПТ та навколишнім середовищем за умови відсутності енергії активації (відсутній обтюратор) випаровування рідини відбувається лише на границі розділу між даними об'єктами.

Як відмічено вище точка В є точкою, в якій система знаходиться в стані динамічної або нестійкої рівноваги. Будь-яка флуктуація, випадкова чи керована, може вивести систему із такого стану і вона почне рухатися або, іншими словами, еволюціонувати до стійкої рівноваги одним із можливих шляхів. Такі особливі точки, після проходження яких система набуває нових властивостей руху, називають точками біфуркації (за термінологією синергетики) [173]. Така особлива точка, точка біфуркації, виникає, якщо система рухається до максимуму (локального) вільної енергії. При цьому положення такої точки в динамічних координатах може співпадати і з природним процесом, за яким система рухається в сторону з мінімумом вільної енергії. В точці біфуркації прирощення одного із динамічних параметрів змінює знак, тобто за одним із параметрів (для ефекту ІнтМО – це температура) система починає віддалятися від локальної рівноваги. Наявність точки біфуркації, ще раз доводить те, що система «оточуюче середовище – внутрішнє середовище термостата», за умови протікання ефекту ІнтМО, є проточною по відношенню до маси та теплової енергії динамічною системою, де можливі процеси самоорганізації, які обумовлюють ефективне розсіювання (дисипацію) теплової енергії за рахунок фазових переходів І-го роду. Для такої системи виділяють дві групи параметрів: параметри порядку – внутрішні властивості системи, які визначають масштаб ІнтМО та його кінетику; керуючі параметри – чинники, які дозволяють регулювати потужність ефекту зовнішніми діями.

Оскільки наведення на фазовій площині  $OT \times Op \times O\Psi(T, w_{sun})$  всіх характерних шляхів еволюції системи під час ТМО в термостаті ускладнить його аналіз, перейдемо до проєкцій фазового простору на площину  $OT \times O\Psi(T, w_{sun})$  (рис. 3.3).

На фазовому портреті (рис. 3.3) наведено п'ять характерних шляхів еволюції системи після точки біфуркації, отримані шляхом узагальнення експериментальних досліджень.



**Рисунок 3.3** – Фазовий портрет ТМО в термостаті за характерними шляхами еволюції від стану нестійкої (В) до стану стійкої (С) рівноваги: 1, 2 – ТМО з  $E_A \geq E_B$ ; 3 – ІнТМО ( $E_A < E_B$ ); 4 – зрив ІнТМО з подальшим нагріванням; 5 – зрив ІнТМО з трансформацією у ТМО з  $E_A \geq E_B$

Дані еволюційні шляхи між точками рівноваги також можна ідентифікувати та відстежити за кінетиками температури середовища всередині термостата, наведеними на рис. 3.1. Всі інші шляхи еволюції займають проміжне положення. Еволюція системи за характерними шляхами буде наступною. Якщо керуючі параметри і параметри порядку будуть такими, що система піде за шляхом 1, то кількість рідини всередині

термостата змінюватися практично не буде. В термостаті встановиться рівновага за температурою. Система повернеться за вологовмістом в окіл точки В. Перехід в окіл точки типу центр С для даного шляху еволюції системи відбудеться впродовж часу значно більшого за час спостереження (середню тривалість технологічної обробки). За шляхом 2 – відбувається випаровування рідини на границі розділу «оточуюче середовище – внутрішнє середовище термостата». Такою границею розділу може бути або зовнішня по відношенню до оточуючого середовища поверхня обтюратора або, за умови проникнення газу навколишнього середовища всередину термостата, – відкрита поверхня рідини чи волого ККПТ. Температура за таких умов наближається до температури термостата. Система рухається в окіл точки типу центр С на одну з її еліпсоїдальних траєкторій. За такого характеру протікання процесу завжди виконується умова  $dT \geq 0$  – «запуск» ефекту ІнтМО відсутній. Перехід між точками В та С для даного шляху еволюції системи відбудеться впродовж часу більшого за час спостереження.

За шляхом 3 система рухається до того ж рівноважного стану, що і за шляхом 2, але напрямок руху до точки типу центр С інший. Для такого шляху еволюції умова  $dT \geq 0$  виконується до точки біфуркації (до точки В) та після досягнення сировиною гігроскопічного вологовмісту (після точки Е). Протягом еволюції системи між точками динамічної та стійкої рівноваги виконується умова  $dT < 0$  – має місце, так званий, дефіцит теплоти всередині термостата [69], обумовлений тим, що розсіювання енергії на фазовий перехід рідини І-роду відбувається з більшою швидкістю ніж підведення теплоти від стінок термостата. Відбувається самоорганізація дисипативних структур в ККПТ всередині термостата. Якщо будуть підтримуватися необхідні умови для протікання ІнтМО, то, як було відмічено вище, прирощення температури знову змінить свій знак лише у випадку недостатньої для подальшої самоорганізації дисипативних структур кількості рідкої фази, а саме через її закінчення. При цьому має місце локальний

мінімум температури на шляху до встановлення в системі температури термостата (рис. 3.1).

Ще два еволюційні шляхи 4 та 5 ілюструють, так званий, «зрив» ефекту ІнтМО. За таких шляхів еволюції після точки біфуркації (точка В) виконується умова  $dT < 0$ , яка свідчить про процес самоорганізації дисипативних структур, але після досягнення точки D, через те, що порушуються умови, необхідні для протікання ефекту ІнтМО, спостерігається зміна знаку прирощення температури, тобто –  $dT \geq 0$ . Відбувається «зрив» ефекту ІнтМО – його проявленням є зміна знаку прирощення температури. Подальше протікання процесу можливе двома характерними шляхами: відбудеться або виродження ефекту ІнтМО в процес ТМО з відкритої по відношенню до оточуючого середовища поверхні (шлях 5), або нагрівання середовища всередині термостата до температури його стінки (шлях 4) з подальшим еволюціонуванням до стійкої рівноваги впродовж часу більшого за час спостереження. Необхідно відмітити, що положення точки D може змінюватись вздовж ділянки кривої ВЕ і залежить від причин «зриву» ефекту ІнтМО.

Таким чином, фазова траєкторія ІнтМО відрізняється від ТМО без енергії активації наявністю ділянки у негативній області фазового простору.

Фізичний зміст такої поведінки системи наступний. Функція  $\Psi(T, w_{\text{вун}})$  дорівнює відношенню енергії, яку утримує внутрішнє середовище термостата, до енергії, розсіяної даним середовищем на випаровування (формула (3.3)). Оскільки кінетика вологовмісту під час ІнтМО за наявності рідкої фази у термостаті є незростальною функцією, що підтверджено численними дослідженнями ефекту ІнтМО, то прирощення вологовмісту ККПТ не може бути позитивним. Відповідно, прирощення кількості рідини, що перейшла у газовий стан є невід'ємним  $dw_{\text{вун}} \geq 0$ , таким чином, знаменник у формулі (3.3) є невід'ємним. Тоді для того, щоб функція  $\Psi(T, w_{\text{вун}})$  набула негативних значень, необхідно, щоб від'ємним був чисельник формули (3.3). Чисельник у (3.3) пропорційний енергії, яку

утримує внутрішнє середовище термостата, тобто тепловмісту, який складається із тепловмісту трьох фаз внутрішнього середовища термостата: сухих речовин, рідкої та газової фаз. Від'ємний знак чисельника свідчить про те, що фазовий перехід рідини у газовий стан у внутрішньому середовищі термостата відбувається не тільки за рахунок теплоти, що надходить від стінок термостата, та роботи, що виконується зовнішнім середовищем, але і за рахунок зменшення тепловмісту внутрішнього середовища термостата.

Необхідно відмітити, негативний знак функції  $\Psi(T, w_{\text{вн}})$  є ознакою наявності ІнтМО під час процесу ТМО в термостаті. Важливим є те, що функція  $\Psi(T, w_{\text{вн}})$  може бути негативною лише за наявності рідкої фази в термостаті, тобто за умови прагнення до рівноваги між двома фазами даної динамічної системи – рідиною та газовим суцільним середовищем. Після того, як об'ємна рідина в системі закінчується, система переходить до гігроскопічної області. Функція  $\Psi(T, w_{\text{вн}})$  при цьому змінює знак на позитивний. В даній області характер досягнення рівноваги внутрішнім середовищем термостата визначається властивостями рідини, яку він утримує, а саме, формами зв'язку та структурою.

Площа під негативною ділянкою фазової траєкторії на фазовій площині з координатами  $\Psi(T, w_{\text{вн}})$  та  $T$ , пропорційна частині тепловмісту внутрішнього середовища термостата витраченому на фазовий перехід рідини даного середовища у газовий стан, є критерієм енергоефективності ефекту ІнтМО. При цьому слід відмітити, що її величина становить від 10 до 30% загальної площі під фазовою траєкторією процесу ТМО.

Розглянемо характерні шляхи еволюції з точки зору їх використання на практиці з керуванням ТМО в термостаті з обтюратором.

За еволюційним шляхом 1 (рис. 3.3) сировина знаходиться за температури термостата за практично відсутнього масообміну з зовнішнім середовищем впродовж часу значно більшого за час спостереження. Вивести систему із такого стану на будь-який інший еволюційний шлях можна



відповідною зміною керуючих параметрів та параметрів порядку. Використати даний факт можна, наприклад, для таких процесів, як проварювання, бланшування, пастеризація, термостатування сировини і т. ін. Так в роботі [178] даний еволюційний шлях використовується для гідротермічної обробки крупи перед сушінням для виробництва швидковідновлюваних каш.

За 2 та 3 еволюційними шляхами сировина переводиться із стану з більшим вологовмістом до стану з меншим, тобто відбувається її зневоднення, що може бути використано для сушіння, випарювання, згущення, тощо. При цьому шлях еволюції системи визначає ефективність з точки зору енергетичних витрат та якості отримуваної продукції. Як слідує із вигляду кривих, що описують зміну температури сировини зі зміною її вологовмісту, шлях 2 відповідає традиційному ТМО (не «індукованому»), а шлях 3 – керованому ІнТМО. Рух системи по шляху еволюції 3 дає можливість керувати «запуском», «зривом», «протіканням» процесу ТМО, а також його інтенсивністю, а, відповідно, і продуктивністю апаратної реалізації, що забезпечує даний процес. Попередніми дослідженнями доведено [69, 70, 138-144], що реалізація ефекту ІнТМО для зневоднення вологої сировини, характеризується високою енергоефективністю та якістю отримуваної продукції у порівнянні з більшістю способів зневоднення. Виходячи з цього, при виборі шляху еволюції системи під час зневоднення сировини з ІнТМО з точки зору енергетичних витрат та якості отримуваної сушеної продукції прагнуть до еволюційного шляху 3 [69, 70, 138-144].

Таким чином, аналізом ефекту ТМО в термостаті з обтюратором та трьома фазами у його виділеному внутрішньому об'ємі методом фазового простору, як одним із способів якісного аналізу стану системи, доведено принципові відмінності ефекту ІнТМО (ТМО з енергією активації) від ТМО без енергії активації. Доведено, що ІнТМО є керованим ефектом з широкими можливостями його практичної реалізації.

## 3.2 Системна вода харчової сировини та продуктів

### 3.2.1 Обґрунтування визначення «системна вода»

Одним із основних параметрів порядку ефекту ІнТМО є властивість рідини всередині термостата переходити до газового стану, обумовлена взаємодією її з оточенням – сухими речовинами, з точки зору практичного застосування ІнТМО – властивість сировини утримувати рідину. У феноменологічних рівняннях ефекту ІнТМО цей чинник визначається функцією  $f_{\text{sun}}(p, T)$ , яка обумовлює величину потоку маси (2.21) до суцільного газового середовища всередині термостата, що утворюється на етапі досягнення динамічної рівноваги. Функція  $f_{\text{sun}}(p, T)$  визначає швидкість випаровування рідини з одиниці площі поверхні, визначається тиском і температурою всередині термостата та залежить від форми зв'язку рідини з твердим тілом всередині термостата та її структури. Виходячи з цього, інформація про форми та структуру рідини всередині термостата є вихідною для керування ІнТМО. При цьому слід відмітити, існує зворотній зв'язок між динамічними характеристиками протікання ефекту ІнТМО та динамічною поведінкою системної рідини всередині термостата [69, 70], що надає можливість керувати як характером ІнТМО, так і властивостями отримуваної продукції та енерговитратами на її отримання.

Виходячи із класичних поглядів [179] будемо вважати, що будь-яку вологоутримуючу систему можна представити як таку, що складається із води у рідкому, газоподібному або твердому стані та сухих речовин в розчиненому та твердому стані. Вода, що утримується системою, має різні форми зв'язку та структуру. При цьому, в твердому (кристалічному) стані вода знаходиться за температури  $t < 0^{\circ}\text{C}$ , в рідкому – як за позитивних ( $0^{\circ}\text{C} \leq t \leq 100^{\circ}\text{C}$ ), так і негативних ( $t < 0^{\circ}\text{C}$ ) температур, якщо в ній розчинені електроліти, або молекули утворюють фізико-хімічні зв'язки з сухими речовинами. Рідка вода може видалятися із системи механічно або

через фазовий перехід I роду. Газоподібна вода знаходиться в системі за будь-яких температур, а її кількість визначається рівновагою за даних температури  $T$  та тиску  $p$  між рідкою та твердою водою й оточуючим середовищем. Таким чином, у випадку процесу ТМО слід враховувати рівновагу між фазами і, таким чином, форми зв'язку води системи з сухими речовинами та її структуру, що складають деяке середовище в гетерогенній трьохфазній системі, яке визначає основу поведінки тіла в цілому, як об'єкта масообміну.

Визначимо, що вода за формою зв'язку з сухою речовиною – це частина від загальної кількості рідкої води, яка ідентифікується за феноменологічними ознаками її внутрішньо- та міжмолекулярних зв'язків; вода за структурою – частина загальної кількості води, що ідентифікується відносним просторовим розташуванням певної кількості молей води відносно молей сухих речовин. Кількість води за формою зв'язку та структурою можуть не співпадати, особливо за межами рівноваги з оточенням. Частину води системи, яка проявляє властивості, відмінні від властивостей об'ємної рідкої води або так званої «вільної води», називають «зв'язаною водою».

Виходячи із ЯМР-досліджень, на відміну від класичних поглядів Ребіндера, де в якості єдиного критерію для класифікації форм зв'язку вологи з матеріалом прийнята величина вільної енергії ізотермічного зневоднення [180-184], ступінь «зв'язаності» вологи визначають за рухливістю молекул води [185]. В той же час, в теорії та практиці ЕПР відомий метод спінових міток, для якого розділення води на «зв'язану» та «вільну» проводиться виходячи з її властивостей розчиняти сіль, яка утримує спінову мітку [186]. Воду також класифікують, виходячи із температури її кристалізації або із величини її діелектричної проникності [187].

Ще одна точка зору на дані поняття витікає із класичного визначення «зв'язаного стану»: «зв'язаний стан – це стан системи частинок, за якого їх відносний рух відбувається в обмеженій частині простору впродовж тривалого часу у порівнянні з характерним для даної системи періодами». У

загальному випадку, виходячи із класичного фізичного визначення, вся рідина, яку утримує продукт, є зв'язаною [188] тим або іншим механізмом.

Тобто, існує достатньо велика кількість методів дослідження рідин харчової сировини та продуктів, але під час їх застосування виникають певні труднощі, такі як: тривалість вимірювань, труднощі у визначенні кількості різних форм зв'язку рідини, незадовільна кореляція молекулярно-кінетичних характеристик з термодинамічними характеристиками, вимоги до вмісту рідини досліджуваного зразка, що значно збільшує похибки вимірів в області гігроскопічного стану [189].

З погляду на означене та з метою удосконалення підходів до методів кількісного та якісного аналізу властивостей рідини в харчовій сировині та продуктах, для рідини всередині термостата введено поняття «системна рідина» або «системна вода» [189] – це рідка частина, що знаходиться в об'ємі харчової системи всередині термостата впродовж часу не меншого за характерний час технологічної операції та яка визначає перебіг ТМО і функціонально-технологічні властивості цієї харчової системи. Далі в роботі використовується саме ця термінологія, тобто рідина будь-якої харчової системи у внутрішньому виділеному об'ємі термостата вважається системною рідиною [190, 191].

Очевидно, процес видалення системної води із тіла супроводжується порушенням її зв'язку з сухими речовинами, на що витрачається визначена енергія [192]. Виходячи з цього, форма та структура системної води вологої сировини є одним із параметрів порядку для динамічної системи «оточуюче середовище – термостат з вологим ККПТ», який має визначальний вплив на характер ІнТМО і, при цьому, в свою чергу визначається характером протікання ефекту ІнТМО [150].

Поділимо сухі речовини будь якої харчової сировини або продуктів на розчинні, які утворюють гелі (число молів позначимо як  $v_{c.p.}^{розч}$ ), та нерозчинні, що приймають участь в утворенні границь поділу в системі

(число молів позначимо як  $v_{c.p.}^{нерозч}$ ). Тоді мольне відношення сухих речовин ( $v_{c.p.}$ ) до кількості системної води ( $v_{c.в.}$ ) матиме вигляд:

$$C_{мол} = \frac{v_{c.p.}}{v_{c.в.}} = \frac{v_{c.p.}^{розч} + v_{c.p.}^{нерозч}}{v_{c.в.}}. \quad (3.4)$$

Вся системна вода умовно розділяється на  $n$  форм зв'язку:

$$v_{c.в.} = a_1 v_{c.в.} + a_2 v_{c.в.} + \dots + a_n v_{c.в.} = v_{c.в.} \sum_{i=1}^n a_i, \quad (3.5)$$

де  $a_i$  – частка від загальної кількості системної води (в молях) з  $i$ -ою формою зв'язку з матеріалом.

Тоді

$$C_{мол} = \frac{v_{c.p.}^{розч} + v_{c.p.}^{нерозч}}{v_{c.в.} \sum_{i=1}^n a_i}. \quad (3.6)$$

Якщо в системі вміщується  $k$  «сухих» компонентів:

$$v_{c.p.} = \sum_{j=1}^k v_{c.p.}^j. \quad (3.7)$$

Тоді отримаємо:

$$C_{мол} = \frac{\sum_{j=1}^k v_{c.p.}^j}{v_{c.в.} \sum_{i=1}^n a_i}. \quad (3.8)$$

Якщо припустити, що за технологічної обробки хімічних реакцій не відбувалось, а системна вода не видалялась та не зазнавала фазових

перетворень I-го роду, тоді в процесі технологічної обробки мольна концентрація системної води в багатокомпонентній харчовій системі залишається сталою:

$$C_{\text{мол}} = \frac{V_{\text{с.р.}}}{V_{\text{с.в.}}} = \text{const}. \quad (3.9)$$

Виходячи з рівнянь (3.8) та (3.9), отримаємо:

$$C_{\text{мол}} = \frac{V_{\text{с.р.}}}{V_{\text{с.в.}}} = \frac{\sum_{j=1}^k V_{\text{с.р.}}^j}{V_{\text{с.в.}} \sum_{i=1}^n a_i} = \frac{\sum_{j=1}^k \frac{V_{\text{с.р.}}^j}{V_{\text{с.в.}}}}{\sum_{i=1}^n a_i} = \frac{\sum_{j=1}^k g_j}{\sum_{i=1}^n a_i} \geq 0, V_{\text{с.в.}} > 0, \quad (3.10)$$

де  $g_j = \frac{\sum_{j=1}^k V_{\text{с.р.}}^j}{V_{\text{с.в.}}}$  – відносна мольна частка j-ої компоненти сухої речовини у системній воді.

Із рівняння (3.10) для частки від загальної кількості системної води (в молях) з f-ою формою зв'язку з матеріалом маємо:

$$a_f = \frac{\sum_{j=1}^k g_j}{C_{\text{мол}}} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq f}}^n a_i. \quad (3.11)$$

Виходячи з такого погляду на системну воду і на складові харчової сировини та продуктів, актуальним є створення модельних систем, які характеризуються, по можливості, меншою кількістю компонентів та простотою інтерпретації форм зв'язку води з ними. Отримання таких модельних систем можливо забезпечити шляхом визначеної пробопідготовки, яка полягає в отриманні зразка з максимально можливим

однорідним складом та мінімально можливою кількістю складових. Так, наприклад, якщо це зернова культура, то зразки з неї повинні утримувати по можливості лише крохмаль, або лише клейковину і т. ін.

Кожному зразку такої бази даних модельних харчових систем буде відповідати  $k$  відносних мольних часток  $k$  компонентів сухої речовини у системній воді ( $g_j$ ) та  $n$  мольних часток від загальної кількості системної води з  $n$  формами зв'язку з матеріалом ( $a_i$ ). Значення відносних мольних часток компонентів сухої речовини у системній воді  $g_j$  визначаються виходячи із хімічного складу зразка, а мольні частки від загальної кількості системної води з  $i$ -тою формою зв'язку з матеріалом  $a_i$  – виходячи із експериментальних даних. Під експериментальними даними маються на увазі дані, отримані різними методами дослідження води: низькотемпературним калориметричним, тензометричним, реологічним, ЕПР, ЯМР, диференціально скануючої калориметрії, молекулярної динаміки і таке інше.

Під час використання будь-якого із методів дослідження води є можливість знайти значення мольних часток води  $A_i$ , які представляють собою суму деякої кількості  $a_i$ , тобто загальна кількість води буде мати вигляд:

$$v_{c.v.} = v_{c.v.} \left( \sum_{i=1}^l a_i + \sum_{i=l}^s a_i + \dots + \sum_{i=r}^n a_i \right) = v_{c.v.} (A_0 + A_1 + \dots + A_m) = v_{c.v.} \sum_{i=0}^m A_i \quad (3.12)$$

Кількість  $A_i$  визначається методом та методикою дослідження. Наприклад, для такого термодинамічного метода як калориметричний, який базується на визначенні температури кристалізації та кількості теплоти, що виділяється під час даного процесу за температури охолодження до  $-5$  °С, мольних часток  $A_i$  – всього дві, але для того ж метода за зниження температури, наприклад, до  $-70$  °С кількість  $A_i$  збільшується.

Іншим прикладом визначення  $A_i$  є такий молекулярно-кінетичний метод як метод ЕПР-спінових міток. В даному експерименті мітка дає сигнал в залежності від того чи знаходиться вона в розчині, чи випала в осад через перенасиченість розчину. Для такого способу мольних часток  $A_i$  – дві. За допомогою ЕПР методу також досліджують воду за величиною її діелектричної проникності, при цьому кількість  $A_i$  зростає і визначається чутливістю реєструючого приладу.

Методів дослідження води достатньо велика кількість, але набір мольних часток  $a_i$ , які входять до мольних часток  $A_i$  – різний. При цьому кількість  $A_i$  залежить не тільки від умов експерименту, а і від інтерпретації отриманих результатів.

Використовуючи отриману таким чином базу даних, воду будь-якої харчової сировини або продукту, за умови наявного відомого хімічного складу, можна проаналізувати на предмет кількісної та якісної оцінки форм та видів зв'язку води з сухими речовинами обраного зразку. Порівняння величин  $g_j$  та  $a_i$  для харчового продукту з тими ж величинами із бази даних дає можливість прогнозувати та науково обґрунтовувати функціонально-технологічну роль того чи іншого компонента.

Особливо слід відзначити ґрунтовність такого аналізу для харчових продуктів та сировини, що підлягають технологічній обробці з процесами тепло- та масообміну. У цьому випадку прагнення до рівноваги між агрегатними станами води є основним кінетичним та енергетичним чинником ефективності реалізації обраної технології. Тобто системна вода є тим уявленням, використання та аналіз якого дозволить науково обґрунтовувати певні енерготехнологічні процеси.

Як відмічено вище, у феноменологічних рівняннях ефекту ІнтМО (2.21) властивість рідини переходити до газового стану враховується функцією  $f_{\text{вун}}(p, T)$ , яка обумовлює величину потоку маси до суцільного газового середовища всередині термостата: функція  $f_{\text{вун}}(p, T)$  визначається



тиском і температурою всередині термостата та залежить від форми зв'язку рідини з сухими речовинами всередині термостата та її структури. Умовно її можна представити як суму:

$$f_{\text{вун}}(p, T) = A_0 \cdot f_{\text{вун}}^0(p, T) + A_1 \cdot f_{\text{вун}}^1(p, T) + \dots + A_m \cdot f_{\text{вун}}^m(p, T), \quad (3.13)$$

де  $f_{\text{вун}}^i(p, T)$  – визначається лише тиском та температурою для рідини з відповідною формою зв'язку з сухими речовинами;

$A_0$  – відносна частка системної рідини, яка має властивості об'ємної (вільної) рідини.

Якщо в термостаті знаходиться тільки рідина  $A_0=1$ . Частина системної рідини  $A_0$  є тією частиною, яка бере участь у масообміні під час ІнТМО, тому аналіз функції  $f_{\text{вун}}(p, T)$  може бути обмежений першим доданком.

Необхідно відмітити, що частина системної води, яка не приймає участь у масообміні під час ІнТМО – не випаровується за температури менше 100 °С, не замерзає за температури 0 °С, не витікає тощо, та визначає вимоги до умов зберігання харчової сировини та продуктів.

Таким чином, обґрунтовано доцільність розрахунку мольних, а не масових концентрацій для складових харчової системи. В рамках викладеного погляду на воду харчової сировини та продуктів проведено дослідження, метою яких було отримання нових наукових даних про стан та структуру води різних харчових систем в процесі технологічної обробки з ТМО; наведення кореляційних зв'язків між результатами досліджень вологи харчових систем, отриманих різними термодинамічними та молекулярно-кінетичними методами [193-202].

### 3.2.2 Дослідження системної води харчових систем низькотемпературним калориметричним методом

Одним із методів дослідження системної води харчової сировини та продуктів є низькотемпературний калориметричний метод [203]. Відомо, що температури кристалізації води (фазовий перехід I роду) або переходу її із рідкого до аморфного стану (фазовий перехід II роду) обумовлені формою її зв'язку з сухими речовинами [204]. Виходячи з цього, фіксуючи температуру фазового переходу та кількість теплоти, яка при цьому виділяється за умови охолодження зразка досліджуваної харчової системи, існує можливість аналізу системної води на предмет кількісної та якісної оцінки форм та видів її зв'язку з сухими речовинами даної харчової системи.

Предметом досліджень наведених в даному підрозділі є харчова сировина, напівфабрикати та продукція, для яких гідротермічна обробка є однією із технологічних операцій, для якої може бути застосований ефект ІнтМО із забезпеченням визначених умов. Для такої продукції, як бісквіти та пастила, ефект ІнтМО може бути використаний і для зневоднення, оскільки дана операція входить до технологічної схеми їх виробництва. Як відмічено раніше, інформація про системну воду харчової системи дозволяє спрогнозувати зміни її властивостей за гідротермічної обробки, зневоднення або зберігання та є вихідними даними для моделювання цих процесів. Також необхідно відмітити, що отримана інформація містить нові наукові дані про стан та структуру води досліджуваних харчових систем.

Всі досліджувані харчові системи можуть бути віднесені або до ККПТ, або до КТ.

На рис. 3.4 представлена типова термограма, отримана під час заморожування вологого зразка за рівноважної температури калориметра, яка дорівнювала  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ . На осі ординат відкладено різницю температур ( $\theta$ ) між входом та виходом калориметра, а на осі абсцис – час ( $\tau$ ) у відносних одиницях (пронормований на загальну тривалість процесу).

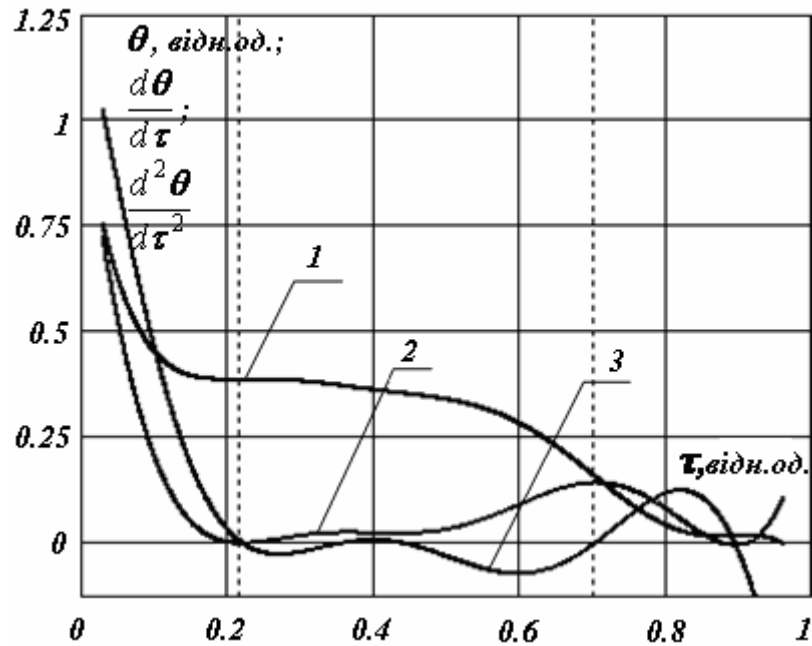


Рисунок 3.4 – Різниця температур (у відносних одиницях) між входом та виходом калориметру (1), перша (2) та друга (3) похідні від неї для вологого зразка

Виходячи з виду кривої, її можна розділити на три характерні ділянки, відділені одна від іншої на рис. 3.4 пунктирними лініями. Площа під першою ділянкою (I) пропорційна кількості теплоти, що виділяється під час охолодження об'єкта, який складається з системної води й сухих речовин, до температури кристалізації вільної води ( $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Площа під другою ділянкою кривої (II) відповідає кількості теплоти, що виділяється під час кристалізації води харчової системи, для якої можливий фазовий перехід I роду за температури  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Площа під третьою (III) – кількості теплоти, що виділяється під час охолодження сухих речовин, рідкої системної води та льоду, що утворився при кристалізації за температури  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , до кінцевої температури калориметра. Охолодження тіла, як до температури кристалізації вільної вологи, так і після, відбувається за експоненціальною залежністю. Швидкість зміни даної функції в початковій точці має максимум, а в кінцевій – мінімум. Виходячи із цього, границею розділу вибиралась лінія, що проходить через точку, в якій перша похідна від різниці

температур  $\frac{d\theta}{d\tau}$  має екстремум (рис. 3.4). Значення моментів часу, за яких

$\frac{d\theta}{d\tau}$  має відповідні екстремуми, визначались за коренями другої похідної від функції  $\theta(\tau)$ . Площі під різними ділянками кривої розраховувалися як інтеграл від апроксимаційної функції у відповідних границях. Площа під другою ділянкою пропорційна масі води, для якої має місце фазовий перехід I роду за температури  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Виходячи з вищевикладеного, за такої температури термостата відносних мольних часток системної води  $A_i$  – дві. Позначимо їх як –  $A_{k0}$  та  $A_{k1}$ , де індекс «0» відповідає частині системної води, для якої відбувся фазовий перехід I роду за даної температури калориметру. Індекс «1» відповідає частині системної води, яка залишилась у рідкому стані.

Необхідно відмітити, з (3.12) витікає, сума відносних мольних часток дорівнює одиниці:

$$\sum_{i=0}^m A_i = 1, \quad (3.14)$$

де  $m$ , як відмічено вище, визначається методом та методикою дослідження системної води. Відповідно для досліджень калориметричним методом за рівноважної температури калориметра  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $m=1$ , кількість  $m$  дорівнює 2.

Першим предметом дослідження [197, 198] були КТ, які являли собою пастоподібні напівфабрикати із плодово-ягідної сировини (абрикосового, сливового та яблучного пюре) з додаванням пектину та цукру. Вміст складових даних КТ наступний: зразок № 1 – 94,5% плодово-ягідного пюре (64% яблучного пюре, 31% абрикосового пюре), 5% цукру та 0,5% пектину; зразок № 2 – 92,3% плодово-ягідного пюре (37% яблучного пюре, 37% абрикосового пюре, 18% сливового пюре), 7% цукру та 0,7% пектину;

зразок № 3 – 88% плодово-ягідного пюре (58% абрикосового пюре, 29% сливового пюре), 10% цукру та 2,0% пектину. Досліджувались пастоподібні напівфабрикати свіжоприготовані та після 9 міс. зберігання за температури -12 °С.

В табл. 3.1 наведені відносні частки системної води досліджуваних зразків, отримані низькотемпературним калориметричним методом за рівноважної температури калориметра -12 °С.

Таблиця 3.1

**Відносні частки вимороженої та невимороженої за температури мінус 12 °С системної води модельних КТ із плодово-ягідної сировини з додаванням пектину та цукру**

Зразок КТ із плодово-ягідної сировини з додаванням	$A_{k1}$ , кг/кг	$A_{k0}$ , кг/кг
свіжоприготовані		
5% цукру, 0,5 пектину	0,57	0,43
7% цукру, 0,7% пектину	0,62	0,38
10% цукру, 2,0% пектину	0,65	0,35
після 9 місяців зберігання		
5% цукру, 0,5% пектину	0,45	0,55
7% цукру, 0,7% пектину	0,56	0,44
10% цукру, 2,0% пектину	0,61	0,39

Відносна частка вимороженої системної води ( $A_{k0}$ ) у зразку № 3 найменша і дорівнює 0,35 кг/кг, що в 1,1 разу менше, ніж у зразку № 2 та у 1,2 разу менше ніж у зразку № 1, що обумовлено більшою кількістю пектину у зразку № 3 порівняно з двома іншими. Відносна частка вимороженої системної води у досліджуваних напівфабрикатах у порівнянні із контрольними зразками (сировина для пастоподібних напівфабрикатів без додавання цукру та пектину) більша, у відповідності до кількості внесених добавок, на 15...20%.

В процесі зберігання з вологою в пастоподібних напівфабрикатах відбулись наступні зміни: частка вимороженої вологи ( $A_{k0}$ ) у зразку № 1 збільшилась в 1,3 разу; в зразку № 2 – в 1,15 разу; в зразку № 3 – в 1,1 разу. Збільшення частки вимороженої вологи пояснюється гідролізом цукрів, дубильних і пектинових речовин. Дані реакції супроводжуються збільшенням кількості системної води, для якої можливий фазовий перехід I роду за температури 0 °С.

Таким чином, отримані результати свідчать про те, що додавання пектину сприяє, по-перше, зменшенню частини системної води, для якої відбувся фазовий перехід I роду за даної температури калориметру (-12 °С). По-друге, додавання пектину сприяє зменшенню змін у співвідношенні  $A_{k0}/A_{k1}$ , тобто між вимороженою та невимороженою вологою за температури заморозування -12 °С, у КТ із плодово-ягідної сировини з додаванням пектину та цукру в процесі зберігання впродовж 9 міс.

Другим предметом дослідження є зразки, що представляють модельне КТ із молоковмісної сировини з різною кількістю доданих пектину цитрусового низькоетерифікованого та крохмалю кукурудзяного модифікованого [193]. Отримані результати наведені в таблиці 3.2.

Як видно з табл. 3.2 для свіжоприготованих зразків коефіцієнти  $A_{k0}$  та  $A_{k1}$  відрізняються для різних КТ із даної серії не суттєво – в межах похибки. Отримане свідчить про те, що для даної молоковмісної сировини застосування таких концентрацій пектину цитрусового низькоетерифікованого та крохмалю кукурудзяного модифікованого не призводять до суттєвого збільшення частки системної вологи, для якої має місце фазовий перехід I роду за рівноважної температури калориметра -12 °С. При цьому відносна частка вимороженої системної води у досліджуваних модельних КТ із молоковмісної сировини у порівнянні із контрольним зразком (пектину цитрусового низькоетерифікованого та крохмалю кукурудзяного модифікованого) більша на 11...12%.

Однак після зберігання протягом 28 діб результат інший. Так для зразка з додаванням лише пектину, частина системної води, для якої відбувся фазовий перехід I роду (кількість вимороженої води), збільшилась у 1,9 разу; для зразка з додаванням 0,8% пектину та 1,0% крохмалю – у 1,44 разу; для зразка з додаванням 0,8% пектину та 3,0% крохмалю – у 1,35 разу; для зразка з додаванням 1,1% пектину та 1,0% крохмалю – у 1,3 разу. Виходячи з отриманих результатів, слідує, що додавання пектину цитрусового низькоетерифікованого та крохмалю кукурудзяного модифікованого в модельні КТ із молоковмісної сировини сприяє збереженню властивостей системної води під час зберігання і є визначальним чинником під час визначення раціональних умов зберігання харчової продукції з таким складом.

Таблиця 3.2

**Відносні частки вимороженої та невимороженої за температури  $\mu\text{с } 12^{\circ}\text{C}$  системної води модельних КТ із молоковмісної сировини з додаванням пектину цитрусового низькоетерифікованого та крохмалю кукурудзяного модифікованого**

Зразок КТ із додаванням:	$A_{k1}$ , кг/кг	$A_{k0}$ , кг/кг
свіжоприготовані		
0,8% пектину	0,18	0,82
0,8% пектину, 1,0% крохмалю	0,18	0,82
0,8% пектину, 3,0% крохмалю	0,17	0,83
1,1% пектину, 1,0% крохмалю	0,13	0,87
після 28 діб зберігання		
0,8% пектину	0,35	0,65
0,8% пектину, 1,0% крохмалю	0,26	0,74
0,8% пектину, 3,0% крохмалю	0,23	0,77
1,1% пектину, 1,0% крохмалю	0,17	0,83

Третім предметом дослідження [194, 196] є зразки, що представляють модельне КТ із сировини тваринного походження з додаванням еламіну та

напівфабрикату харчового кісткового (НКХ) і без даних добавок. НКХ додавався у кількості 10% до маси сировини, а еламін – у кількості 1%.

Виходячи з отриманих результатів, наведених у табл. 3.3, додавання НКХ та еламіну у КТ із сировини тваринного походження сприяє зменшенню частини системної води, для якої відбувся фазовий перехід I роду (відносна кількість вимороженої системної води), у порівнянні з контролем. Так для КТ із м'ясного паштету, як і для КТ із печінкового паштету, кількість вимороженої води зменшилась за умови додавання до нього НКХ та еламіну у 1,1 разу.

Таблиця 3.3

**Відносні частки вимороженої та невимороженої за температури мінус 12 °С системної води модельних КТ із сировини тваринного походження з додаванням НКХ та еламіну**

Зразок КТ із сировини тваринного походження:	$A_{k1}$ , кг/кг	$A_{k0}$ , кг/кг
свіжоприготовані		
м'ясний паштет (контроль)	0,51	0,49
м'ясний паштет з НКХ та еламіном	0,46	0,54
печінковий паштет (контроль)	0,53	0,47
печінковий паштет з НКХ та еламіном	0,48	0,52
після зберігання (20 діб за температури 1...4 °С)		
м'ясний паштет (контроль)	0,64	0,36
м'ясний паштет з НКХ та еламіном	0,58	0,42
печінковий паштет (контроль)	0,66	0,34
печінковий паштет з НКХ та еламіном	0,54	0,46

Після зберігання досліджуваних КТ відносна кількість вимороженої системної води збільшилась у 1,25 разу для всіх зразків. Отримане свідчить про несуттєвий вплив використаних добавок на збереження властивостей системної води КТ із даної сировини тваринного походження, тобто в



сировині без добавок та з добавками зміни відносної кількості вимороженої системної води однакові.

Четвертим предметом дослідження [195, 202], що представляє модельне КТ, є зразки агарових драглів з додаванням концентратів тваринних білків та цукру. Використовувались концентрати тваринних білків Сканпро Т95 та Сканпро Т91, отримувані з колагеновмісної сировини шляхом гідротермічного або ферментативного гідролізу. Отримані дані наведені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4

**Відносні частки вимороженої та невимороженої за температури мінус 12 °С системної води модельних КТ із агарових драглів з додаванням концентратів тваринних білків Сканпро Т95 і Сканпро Т91 та цукру**

Зразок КТ з додаванням концентратів тваринних білків та цукру:	$A_{k1}, \text{кг/кг}$	$A_{k0}, \text{кг/кг}$
<b>свіжоприготовані</b>		
агарові драгли (контроль)	0,23	0,78
20% цукру	0,07	0,93
40% цукру	0,05	0,95
0,4% Сканпро Т95	0,10	0,90
0,4% Сканпро Т95 та 20% цукру	0,05	0,95
0,6% Сканпро Т95 та 20% цукру	0,03	0,97
0,4% Сканпро Т91	0,11	0,89

Додавання до агарових драглів цукру у кількості 20% зменшує відносну кількість вимороженої системної води у 3,3 разу, а у кількості 40% – у 4,6 разу. Додавання концентратів тваринних білків Сканпро Т95 та Сканпро Т91 зменшує відносну кількість вимороженої системної води лише у тільки у 2,3 і 2,1 разу відповідно. Очевидно, зменшення  $A_{k1}$  для зразків КТ із агарових драглів з додаванням цукру та концентратів тваринних білків обумовлені у більшому наявності цукру, а не концентрату тваринних білків.

Слід вважати, що частина системної води, для якої відбувся перехід у твердий стан за температури  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , буде кипіти за температури  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Оскільки ефект ІнтМО протікає всередині граничного циклу рідини, тобто між температурами кристалізації та кипіння, то саме ця частина системної води буде визначати швидкість випаровування рідини з одиниці площі поверхні та вид функції  $f_{\text{вип}}(p, T)$  за визначених тиску і температури всередині термостата.

### 3.2.3 Дослідження системної води харчових систем тензометричним методом

На практиці для урахування співвідношення між системною водою, що має властивості об'ємної води, та системною водою, яка має зв'язок з сухими речовинами системи, часто використовується термін «активність води» [205-207]. Активність води  $A_w$  розраховується, як відношення парціального тиску водяної пари в сировині або продукті  $p_{\text{суст}}$  до парціального тиску водяної пари над поверхнею об'ємної води  $p_0$  за тих же умов [206]. Тобто активність води дорівнює відносній вологості повітря  $\varphi_{\text{нов}}$ , за якої сировина або продукт знаходиться з оточуючим середовищем у рівновазі:

$$A_w = \frac{p_{\text{суст}}}{p_0} = \varphi_{\text{нов}}. \quad (3.15)$$

Виходячи з наведеної формули очевидним є те, що активність води будь-якого ККПТ є одним із чинників, який впливає на вид функції  $f_{\text{вип}}(p, T)$ , а саме на значення  $A_0$ , тобто на кількість системної води, що приймає участь у ІнтМО.

Один із способів визначення активності води є тензометричний метод [208, 209]. Тензометричний метод полягає у тому, що досліджуваний зразок поміщають в ексікатори з фіксованим значенням відносної вологості

повітря  $\varphi$ . Всі ексикатори витримуються за постійної температури навколишнього середовища протягом вимірів. В експериментах, наведених в роботі, температура проведення досліджень тензометричним методом дорівнювала 20...23 °С. Тривалість перебування продукту в ексикаторі визначалася досягненням зразком постійної маси.

За отриманими експериментальними даними будувались ізотерми сорбції. Для визначення активності води будувалась кінетика досягнення зразками рівноважного вологовмісту в різних ексикаторах.

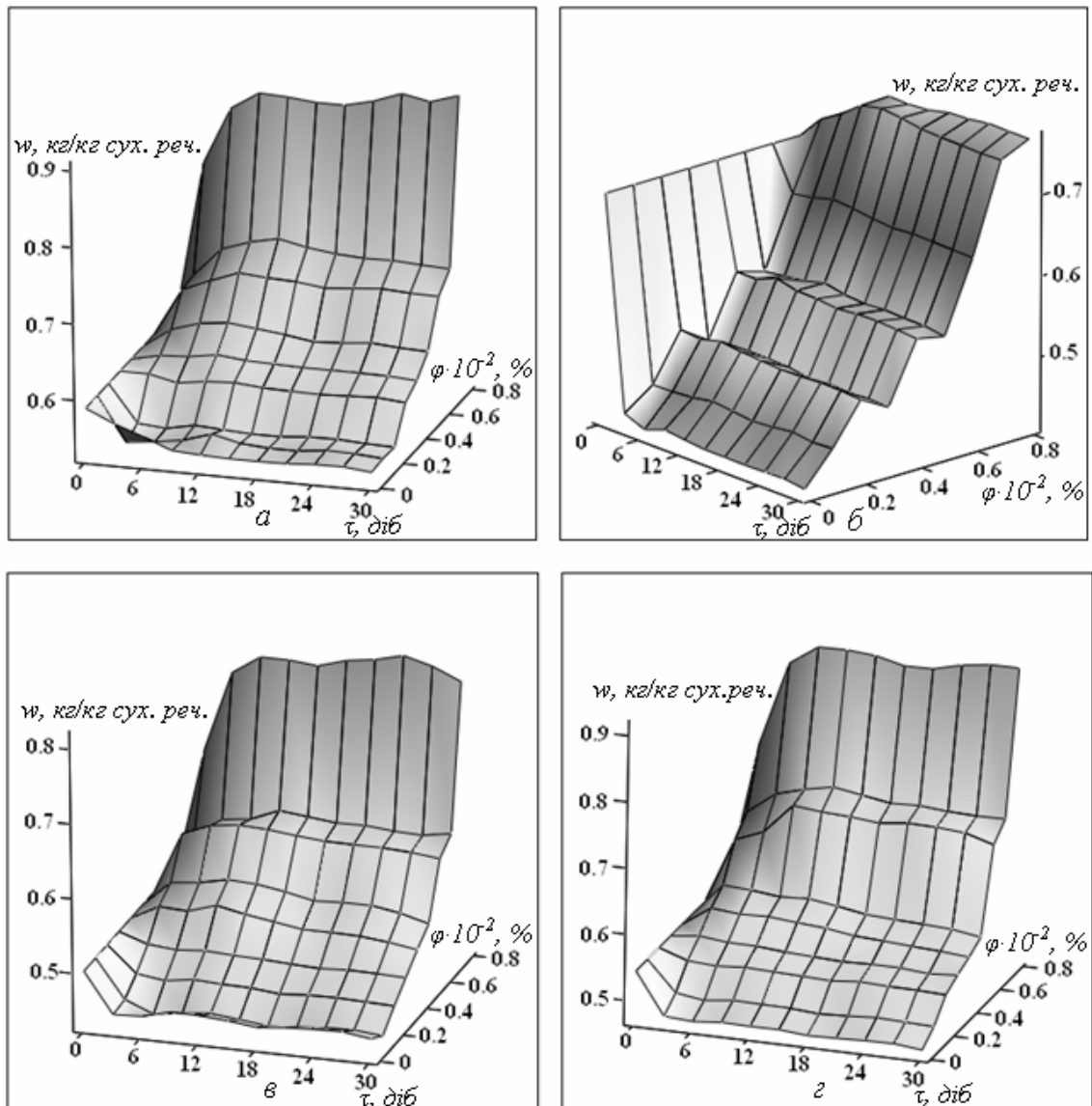
Предметом дослідження у даному випадку були ККПТ [194, 200, 201]: бісквітні борошняні вироби із додаванням стевіозиду та еламіну. Досліджувались наступні зразки ККПТ: № 1 – бісквітний борошняний виріб із додаванням 1,5% еламіну та заміною 50% цукру стевіозидом; № 2 – бісквітний борошняний виріб із додаванням 1,5% еламіну та заміною 75% цукру стевіозидом; № 3 – бісквітний борошняний виріб із додаванням 2% еламіну. Як контроль використовувався зразок ККПТ № 4, який являв собою бісквітний борошняний виріб без додавання стевіозиду та еламіну.

Кінетика вологовмісту досліджуваних зразків наведена на рис. 3.5.

Активність води, як відмічено вище, дорівнює відносній вологості повітря, за якої сировина або продукт знаходиться з оточуючим середовищем у рівновазі. На наведених експериментальних даних такою відносною вологістю повітря є вологість повітря, за якої кінетика вологовмісту зразку має лінійний характер. Для досліджуваних зразків ККПТ із бісквітних борошняних виробів активність води має наступні значення, *кг/кг сух. реч.*: 0,4...0,5 – ККПТ із додаванням 1,5% еламіну та заміною 50% цукру стевіозидом; 0,7...0,8 – ККПТ із додаванням 1,5% еламіну та заміною 75% цукру стевіозидом; 0,4...0,5 – ККПТ із додаванням 2% еламіну. Для контролю активність води дорівнює 0,3...0,4 *кг/кг сух. реч.*

Аналізуючи експериментальні дані, наведені на рис. 3.5, можна зробити наступні висновки. Додавання еламіну, а також заміщення цукру стевіозидом сприяє збільшенню значення активності води. Отримане

свідчить про те, що додаючи у визначеній кількості до ККПТ, яке являє собою бісквітний борошняний виріб, стевіозид та еламін, існує можливість регулювати співвідношення між кількістю системної та вільної води в ККПТ в діапазоні від 0,3 до 0,8 кг/кг.



**Рисунок 3.5 – Кінетика вологовмісту модельних ККПТ (бісквітних борошняних виробів) за різної відносної вологості оточуючого середовища: а – № 1; б – № 2; в – № 3; г – № 4**

Дане співвідношення є одним із визначальних для характеру протікання ефекту ІнтМО, особливо в області гігроскопічного вологовмісту тіла, що знаходиться всередині термостата, та для вимог, що висуваються до умов зберігання харчових продуктів та сировини.

### 3.2.4 Дослідження системної води крохмальутримуючих харчових систем методом ЕПР-спінових міток

Гідротермічній обробці піддають велику кількість різноманітної харчової сировини та продуктів, причому вагому частку серед них займає крохмальутримуюча сировина, така як, наприклад, картопля, зернові культури та харчові продукти з них.

Необхідно відмітити, що хімічний склад традиційних зернових культур наступний: вміст жирів коливається від 1,9 до 3,3%, вміст вуглеводів – від 66,5 до 67,8%, вміст білків – від 11,5 до 12,6%. При цьому вміст крохмалю складає приблизно 60% від загальної маси сировини, що в свою чергу визначає властивості води, яку утримує дана сировина [210, 211]. Зважаючи на викладене, були проведені дослідження властивостей крохмалю утримувати системну воду [212-217].

Досліджувалась системна вода модельних ККПТ із крохмалю [217], які отримуються наступним чином. Із крохмалю заварюється клейстер, який витримується у калориметричній камері за температури  $-10...-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  впродовж 24 годин, після чого розморожується. Варіювання мольної концентрації зразків проводиться шляхом використання різної кількості крохмалю під час заварювання клейстеру, а варіювання величини молекул крохмалю – шляхом використання різних крохмалів. У дослідженнях використовували кукурудзяний ( $1\cdot 10^6$  г/моль), пшеничний ( $2\cdot 10^6$  г/моль) та картопляний ( $6\cdot 10^6$  г/моль) крохмалі. Мольна концентрація досліджуваних зразків дорівнювала,  $\cdot 10^5$  (моль крохмалю)/(моль води): 1,1; 1,9; 4.

Як спінова мітка під час ЕПР-досліджень використовувався іон  $Mn^{2+}$  солі  $MnSO_4$ . Спінову мітку вводили в досліджувані зразки шляхом використання під час заварювання клейстеру розчину солі  $MnSO_4$  [213].

Під час досліджень зразки по черзі розміщали в резонатор ЕПР-спектрометра та висушували до рівноважного вологовмісту (6...8%). В процесі зневоднення безперервно реєстрували сигнал ЕПР.

Спектр ЕПР спіноміченого матеріалу складається з двох: спектр, який представляє собою 6 піків однакової ширини, та спектр, який складається із однієї широкої лінії (методика детально описана в розділі 2). 6-піковий спектр, як описано в розділі 2, це спектр, який дає іон  $Mn^{2+}$  солі  $MnSO_4$ , коли сіль знаходиться в розчиненому стані; 1-піковий – відповідає кристалічному стану солі  $MnSO_4$ . Виходячи із цього вважається, що площа під 6-піковим спектром ( $S_{6p}$ ) пропорційна кількості спінів електронів  $Mn^{2+}$ , які знаходяться в розчині, а площа під 1-піковим ( $S_{1p}$ ) – кількості спінів електронів  $Mn^{2+}$ , які випали в осад через недостатню кількість розчинника. Оскільки зв'язок між атомами молекули даної солі іонний, то по мірі зв'язування вологи або її видалення розчинність солі зменшується, що призводить до зміщення рівноваги



вліво з утворенням недисоційованих молекул. Тобто по характеру змін площ під 6-піковим та 1-піковим сигналами можна досліджувати зміну діелектричної проникності системної води в сировині та продукції із неї під час видалення вологи.

Таким чином, розраховуючи площі під спектрами в процесі зневоднення вологих зразків, можна дослідити процес видалення розчинника із найближчого оточення мітки, тобто іона  $Mn^{2+}$ , а також зміну діелектричної проникності системної води матеріалу.

Приклад спектру, отриманого під час сушіння модельного ККПТ наведено на рис. 2.12.

Зміни площі під 6-піковим та 1-піковим спектрами в процесі зневоднення для різних зразків за різних мольних концентрацій та молярних мас крохмалю мають однаковий характер (рис. 3.6). Так для 6-пікового спектру: за зменшення вологовмісту, відносно початкового,  $S_{6p}$  зменшується

до досягнення певних величин вологовмісту, за яких мають місце локальні мінімум та максимум кривої. При подальшому зменшенні вологовмісту локальних екстремумів немає. Для 1-пікового спектру залежність зворотна.

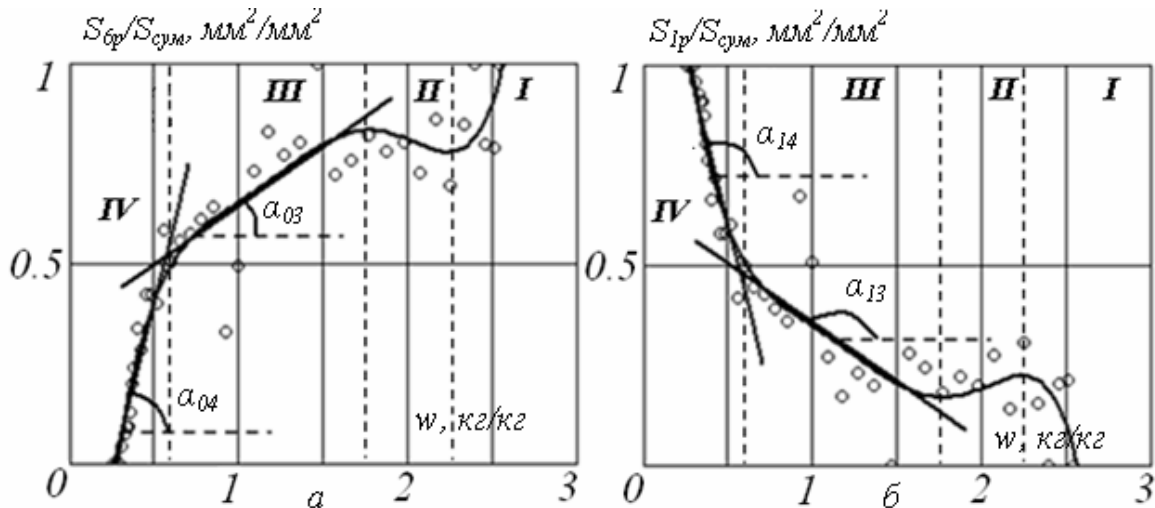


Рисунок 3.6 – Відносні площі (пронормовані на сумарну площу ( $S_{\text{сум}}$ ) під ЕПР-спектром) під 6-піковим ( $S_{6p}$ ) (а) та під 1-піковим ( $S_{1p}$ ) (б) ЕПР-спектрами модельного тіла за різного його вологовмісту  $w$

Кожну із кривих можна розбити на 4 характерні ділянки.

На першій ділянці відбувається інтенсивне видалення системної води з поверхні матеріалу та нагрівання зразка. Через зменшення кількості системної води, зменшується кількість солі, яка знаходиться в розчині, результатом чого є зменшення  $S_{6p}$  та збільшення  $S_{1p}$ .

На другій ділянці видалення вологи продовжується, але розчинна здатність системної води збільшується через підвищення температури і кількість розчиненої солі  $MnSO_4$ , а, відповідно, і кількість іонів в розчині – зростає. В результаті цього  $S_{6p}$  збільшується, а  $S_{1p}$  – зменшується.

На третій ділянці  $S_{6p}$  монотонно зменшується, а  $S_{1p}$  – монотонно збільшується. При цьому при зменшенні вологовмісту на 45...50% (в залежності від досліджуваного модельного тіла) площа під 6-піковим

сигналом зменшилась на 20%, відповідно, площа під 1-піковим сигналом збільшилась на ту ж величину.

На четвертій ділянці характер залежності  $S_{6p}$  та  $S_{1p}$  від вологовмісту зразка той же, але кут нахилу кривої до осі вологовмісту різко збільшується. Оскільки характер кривих стає більш різким, то це свідчить про зменшення частини системної води, яка може розчинювати сіль  $MnSO_4$ . При цьому при зменшенні вологовмісту на 8...10% (в залежності від досліджуваного модельного тіла) площа під 6-піковим сигналом зменшилась на 50%, а площа під 1-піковим, відповідно, збільшилась на 50%. Отримане свідчить про те, що для видалення системної води модельного тіла з вологовмістом, який відповідає четвертій ділянці, необхідно витратити більше енергії порівняно з системною водою на третій ділянці.

Наявність лінійних частин (рис. 3.6) як на третій, так і на четвертій ділянках залежностей  $S_{6p}$  та  $S_{1p}$  від вологовмісту зразка, свідчить про те, що діелектрична проникність системної води, на кожній із них є постійною. Тобто з точки зору розробленої методики, виділяються дві форми зв'язку системної води з матеріалом. Різкий перехід між ділянками відповідає утворенню поверхні розділу при переході до видалення системної води з іншою формою зв'язку.

Виходячи з ізотерм сорбції для модельних тіл із крохмалю, наведених в роботі [145, 216, 217], які отримувались, як описано вище, вологовміст четвертої ділянки (від 0,06...0,2 до 0,5...0,7 кг/кг сух. реч. в залежності від зразка) відповідає вологовмісту гігроскопічної області для таких ККПТ. Враховуючи енергію зв'язку, розраховану для гігроскопічної області матеріалу за Ребіндером, вона для четвертої ділянки укладається в діапазон від  $7 \cdot 10^3$  до  $4 \cdot 10^3$  Дж/моль. Відповідно на третій ділянці видаляється системна вода, очевидно, з меншою енергією зв'язку, тобто з енергією зв'язку менше  $4 \cdot 10^3$  Дж/моль.



Таким чином, точка між четвертою та третьою ділянками визначає перехід системної води між різними формами зв'язку, при чому на четвертій ділянці енергія зв'язку системної води більша у порівнянні з енергією зв'язку на третій ділянці, в зв'язку з утворенням поверхні розділу при видаленні системної води з іншою формою зв'язку.

Оскільки дослідження системної води проводиться у даному випадку непрямым способом, тобто досліджується стан та оточення мітки, то на перших двох ділянках аналіз експериментальних даних ускладнений зміною розчинності солі  $MnSO_4$ . Таким чином, дослідження системної вологи проводилось лише на третій та четвертій ділянках, причому окремо для кожної ділянки, оскільки чутливість мітки на них різна.

ЕПР спектри отримувались під час зневоднення вологих зразків, тобто досліджувалась кінетика процесу видалення вологи, тому кількість молів води на третій та четвертій ділянках можна визначити за формулами:

$$v_{c.в.3}(\tau) = v_{c.в.3}(\tau) \cdot A_{03}(v_{c.в.3}) + v_{c.в.3}(\tau) \cdot A_{13}(v_{c.в.3}), \quad (3.16)$$

$$v_{c.в.4}(\tau) = v_{c.в.4}(\tau) \cdot A_{04}(v_{c.в.4}) + v_{c.в.4}(\tau) \cdot A_{14}(v_{c.в.3}), \quad (3.17)$$

де  $A$  з індексом «0» відповідає частині води, яка є розчинником, а з індексом «1» частині води яка не розчиняє сіль  $MnSO_4$ .

Коефіцієнти  $A$  є тангенсами кута нахилу апроксимаційних прямих на відповідних ділянках кривих, які описують зміну площі під 6-піковим та 1-піковим ЕПР-сигналами під час сушіння вологого зразка:

$$A_{03} = \operatorname{tg} \alpha_{03}; A_{04} = \operatorname{tg} \alpha_{04} \quad (3.18)$$

$$A_{13} = \operatorname{tg} \alpha_{13}; A_{14} = \operatorname{tg} \alpha_{14}. \quad (3.19)$$

Приклад знаходження апроксимаційних прямих наведений на рис. 3.6.

На рис. 3.7 наведені залежності тангенсів кута нахилу на відповідних ділянках апроксимаційних кривих від мольної концентрації зразку для крохмалів з різною молярною масою. На рисунку наведено результати лише для зміни  $S_{6p}$  в процесі сушіння, оскільки зміна  $S_{1p}$  – зворотна.

З даних, наведених на графіках, видно, що тангенс кута нахилу як третьої, так і четвертої ділянок по мірі збільшення мольної концентрації зростає. По мірі збільшення кількості молекул крохмалю в одиниці об'єму зразка збільшується площа поверхні отримуваного модельного тіла та збільшується кількість системної води, яка може виконувати роль розчинника.

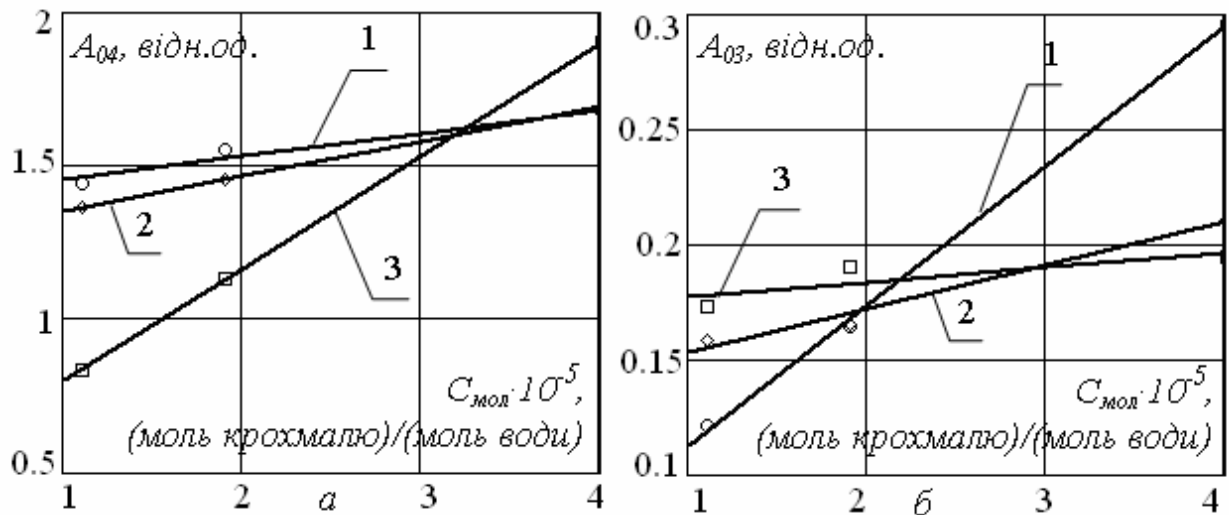


Рисунок 3.7 – Тангенси кута нахилу на четвертій (а) та третій (б) ділянках кривих за різної мольної концентрації зразку для крохмалів з середньою молярною масою,  $g/моль$ : 1 –  $6 \cdot 10^6$ ; 2 –  $2 \cdot 10^6$ ; 3 –  $1 \cdot 10^6$

Необхідно відмітити, що на четвертій ділянці найбільший кут нахилу до осі, на якій відкладено мольну концентрацію, має модельне тіло з крохмалю із найменшою молярною масою ( $1 \cdot 10^6 g/моль$ ), а найменший – із найбільшою ( $6 \cdot 10^6 g/моль$ ). Чим більший кут нахилу має залежність, тим більша частина від загальної кількості системної води може бути розчинником, за умови збільшення мольної концентрації крохмалю в модельному тілі (рис. 3.7 а).

На третій ділянці кривих картина зворотна: найбільший кут нахилу до осі, на якій відкладено мольну концентрацію, має модельне тіло з крохмалю, який має найбільшу із досліджуваних середню молярну масу, а найменший – із крохмалю з найменшою молярною масою (рис. 3.7 б).

Така залежність тангенсів кута нахилу від виду крохмалю та від мольної концентрації крохмалю у ККПТ свідчить про наявність як мінімум трьох структур системної води. Тобто структура визначається молярною масою високомолекулярного сполучення, його гідрофільно-ліофільним співвідношенням полярних-неполярних груп.

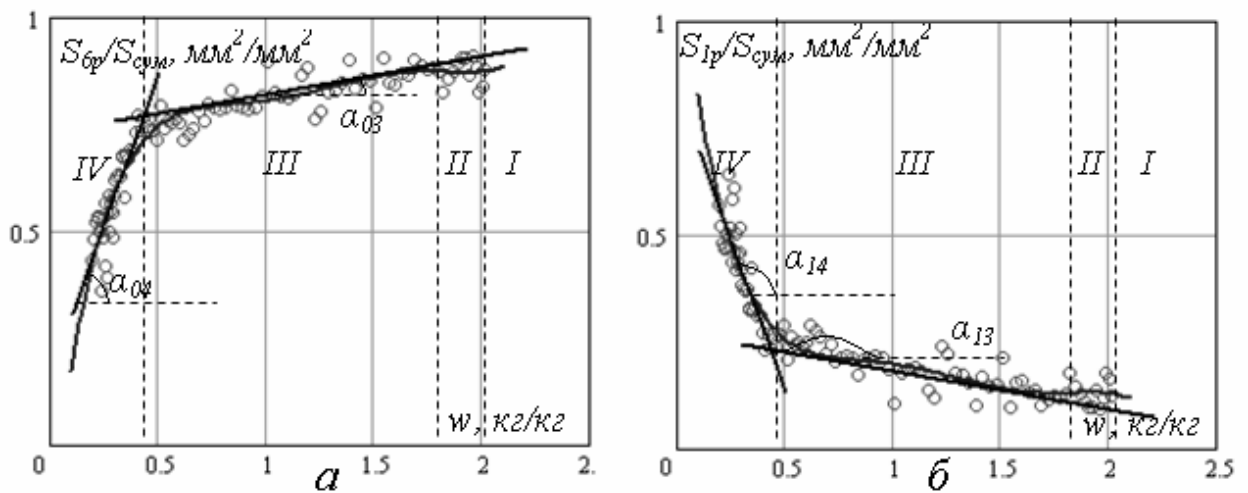
Таким чином, отримані результати свідчать про те, що системна вода модельних тіл із крохмалю має дві форми зв'язку з сухими речовинами, при цьому встановлено, що для таких тіл має місце наявність трьох структур, які визначаються молярною масою високомолекулярного сполучення, яким є крохмаль.

За тією ж методикою було проведено дослідження системної води клейковини пшениці (рис. 3.8). Для розрахунків брали середню молярну масу клейковини пшениці та вважали її рівною  $0,1 \cdot 10^6$  г/моль. Виходячи із середнього значення молярної маси клейковини її молярна концентрація дорівнювала в середньому –  $1 \cdot 10^5$  (моль клейковини)/(моль води).

На рис. 3.8 наведено зміну величини площі під 6-піковим (рис. 3.8 а) та 1-піковим (рис. 3.8 б) ЕПР-спектром модельного ККПТ із клейковини зі зміною вологовмісту зразка під час зневоднення в резонаторі ЕПР-спектрометра.

Характер залежностей такий же, як і для модельних ККПТ із крохмалю. Відмінності полягають у значеннях тангенсів кута нахилу апроксимаційних прямих на відповідних ділянках. Так для 6-пікового спектру ККПТ із клейковини тангенс кута нахилу апроксимаційної прямої на третій ділянці складає – 0,07; а на четвертій – 1,12. Тангенс кута нахилу на четвертій ділянці для ККПТ із клейковини сумірний з тангенсами кута нахилу для ККПТ із крохмалю, а на третій – тангенс кута нахилу менший на 30% від

найменшого значення тангенсу кута нахилу для ККПТ із крохмалю. Так за зменшення вологовмісту на 70...75%, площа під 6-піковим сигналом зменшується на 15...20%, що свідчить про незначне зменшення частини системної води, яка є розчинником, у загальній її кількості. Таким чином, слід вважати що 70...75% системної вологи модельного тіла із клейковини має енергію зв'язку менше  $4 \cdot 10^3$  Дж/моль. Слід вважати, що частка від 25 до 30% системної води модельного тіла із клейковини має енергію зв'язку від  $4 \cdot 10^3$  до  $7 \cdot 10^3$  Дж/моль.



**Рисунок 3.8 – Відносні площі (пронормовані на сумарну площу ( $S_{\text{сум}}$ ) під ЕПР-спектром) під 6-піковим (а) та 1-піковим (б) ЕПР-спектром для модельного тіла з клейковини під час зневоднення від вологовмісту зразка**

Така залежність, як було встановлено для модельних тіл із ККПТ, доводить, що для модельного тіла із клейковини системна вода також має дві форми зв'язку з сухими речовинами. Наявність лінійних частин у наведених залежностях свідчить про сталість діелектричної проникності системної води на кожній із ділянок, а різкий перехід між лінійними частинами свідчить про утворення границі розділу при переході до видалення системної води з іншою формою зв'язку.

Як було відмічено раніше, під час ефекту ІнтМО, а також, що теж важливо, за умов зберігання, транспортування, тощо у харчових продуктах та

сировині встановлюється рівновага між усіма фазами системи. З цього погляду, саме уявлення про системну рідку воду є тим, що дозволяє аналізувати або змінювати умови даної рівноваги: рідка вода одночасно знаходиться у рівновазі як з «сухою» речовиною, так і з газом (пароповітряною сумішшю). Крім того, як показали молекулярно-кінетичні дослідження, системна вода обумовлює необоротні процеси в харчовій сировині та продуктах: зміни у властивостях води як розчинника викликають необоротні зміни у фізико-хімічному стані компонентів харчових продуктів, а саме коагуляції, агрегації, кристалізації тощо. Ці зміни є тими чинниками, що у подальшому формують показники якості, безпеки та функціонально-технологічні властивості харчових продуктів.

### **3.3 Розвинення фізико-математичної моделі ефекту індукованого тепломасообміну**

З метою доведення феноменологічної гіпотези ефекту ІНТМО, висунутої у розділі 2 проведено експериментальні та теоретичні дослідження, результатом яких стало розвинення поглядів на фізико-математичний механізм даного ефекту.

Як відмічено у попередніх підрозділах, внутрішній виділений об'єм термостата, в якому протікає ефект ІНТМО, обмежений його внутрішніми стінками із паронепроникного матеріалу з високою теплопровідністю. Внутрішні стінки термостата є поверхнями, через які організовується теплообмін з його внутрішнім середовищем, тобто теплообмінними поверхнями. Внутрішнє середовище термостата сполучається із зовнішнім середовищем через обтюратори, які виконані на внутрішніх стінках термостата. Необхідними умовами до конструкції термостата є те, що теплообмінні поверхні повинні бути принаймні на порядок більшими за зовнішню площу обтюраторів термостата [150]. При цьому термостат технічно реалізується як деякий ТМО-модуль, визначена теплоємність стінок

якого (у відповідності до необхідних умов реалізації ефекту ІнТМО) забезпечується або теплоємністю середовища (оточуюче середовище), в якому знаходиться даний модуль, або нагрівальними поверхнями, які контактують із стінками модулю.

Виходячи з таких вимог, очевидно, що границя розділу за масообміном «оточуюче середовище – внутрішнє середовище термостата» є об'єм обтюратора, при цьому газове середовище всередині термостата вважається суцільним за парціальним тиском пари рідини.

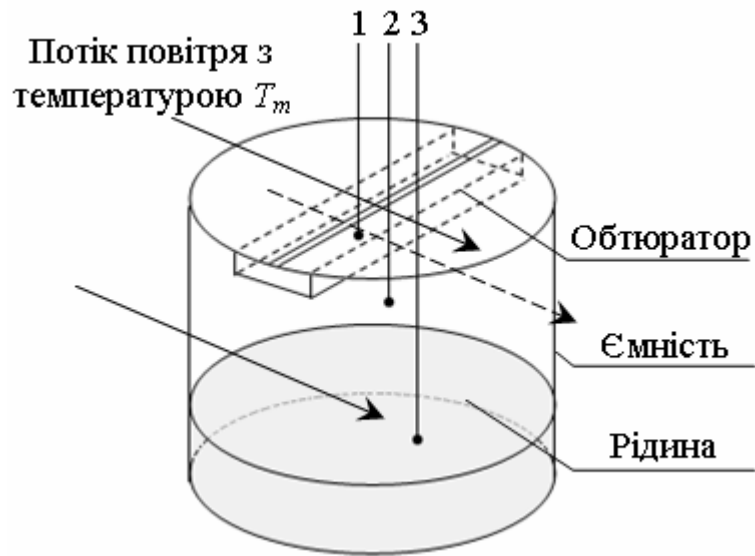
При цьому параметрами порядку, які обумовлюють вихідні вимоги для конструювання апаратів з використанням ефекту ІнТМО, є розміри, конструкція внутрішнього виділеного об'єму термостата, способи та ступень заповнення його сировиною.

Для дослідження впливу на характер ефекту ІнТМО даних параметрів порядку проведено серію експериментів. При цьому дослідження особливостей ТМО за різних умов реалізації ефекту ІнТМО проводили непрямым способом. Під час досліджень ІнТМО реєстрували кінетику вологовмісту ККПТ або КПТ та кінетику температури від термопар, розміщених у внутрішньому об'ємі термостата. За положенням особливих точок кінетики вологовмісту, кінетики температури та фазового портрету ефекту ІнТМО судили про характер та механізм ТМО термостата з навколишнім середовищем.

Дослідження проводились на експериментальних установках, принципові схеми яких наведені на рис. 2.6 та 2.7. Матеріалом для виготовлення стінок термостата, які обмежують його внутрішній об'єм, було скло та листовий алюміній товщиною від 1 до 5 мм, тобто стінки виконані із паронепроникного матеріалу. Місця з'єднання стінок термостата між собою були загерметизовані з використанням силіконового жароміцного герметика. Таким чином, єдиним шляхом для масообміну між оточуючим середовищем та внутрішнім середовищем термостата є обтюратори.

### 3.3.1 Дослідження характеру ефекту індукованого тепломасообміну за температури термостата більшої за температуру кипіння рідини

Найпростішим варіантом організації ефекту ІнтМО є термостат з обтюратором, що утримує рідину ( $A_0=1$ ) та газ (рис. 3.9). Даним дослідженням проводиться моделювання процесів випарювання, концентрування та згущення з використанням ефекту ІнтМО.



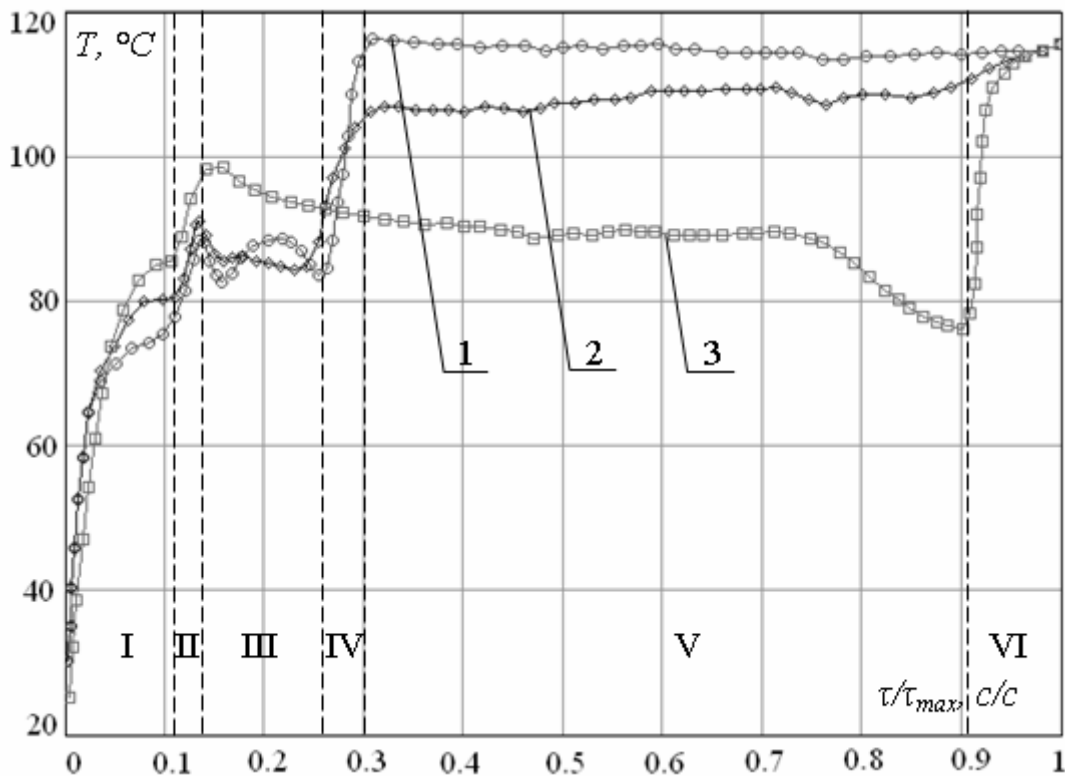
**Рисунок 3.9 – Схема експериментальної установки для моделювання випарювання, концентрування та згущення з використанням ІнтМО за температури термостата більшої за температуру кипіння рідини у його внутрішньому об'ємі: 1, 2, 3 – термопарні**

Дослідження характеру ІнтМО проводилось за атмосферного тиску та температури термостата більшої за температуру кипіння рідини, яка знаходиться у його внутрішньому виділеному об'ємі [218]. Так за атмосферного тиску  $99 \dots 102$  кПа для води цією температурою є температура більша за  $99 \dots 100$  °С, а для етилового спирту – більша за  $77 \dots 78$  °С.

Внутрішня частина термостата, яка використовувалась під час досліджень, являла собою скляну прозору циліндричну емність. У верхній частині емності виконаний обтюратор. Функція створення флуктуації

газового середовища в об'ємі обтюратора та функція термостатування забезпечувались потоком повітря з визначеною температурою, що омиває зовнішню поверхню циліндричної ємності, яка обмежує внутрішнє середовище термостата (рис. 3.9).

Виділений внутрішній об'єм термостата частково або повністю заповнювався рідиною, у якості якої використовувались вода або/та етиловий спирт. Дослідження проводились як за умови використання вологого обтюратора, так і сухого. Зволоження обтюратора проводилось рідиною, яка використовувалась у дослідженні, тобто рідиною, яка знаходилась у виділеному внутрішньому об'ємі термостата. Спостереження за протіканням ефекту ІнТМО проводили візуально та за сигналами від термопар, які знаходились у внутрішньому об'ємі термостата. При цьому термопара 1 реєструє температуру обтюратора, термопари 2 і 3 – відповідно температуру газу та температуру рідкої фази у внутрішньому об'ємі термостата.



**Рисунок 3.10** – Кінетика температури складових внутрішнього об'єму термостата (1, 2, 3 – термопари з рис. 3.9) під час ефекту ІнТМО за температур термостата, °C: I – 95...96; II-VI – 115...116



Кінетика температури ефекту ІнТМО в термостаті зі зволуженим обтюратором наведена на рис. 3.10. Температура термостата в даному дослідженні змінювалась ступінчасто та дорівнювала на першому етапі 95...96 °С, а на другому 115...116 °С. Зміна температури проводилась у два етапи ступінчасто з метою «запуску» ефекту ІнТМО: динамічна система «оточуюче середовище – термостат» має певну інерційність – для «запуску» ефекту ІнТМО необхідне забезпечення відповідних необхідних умов.

Однією з таких необхідних умов є забезпечення суцільності внутрішнього газового середовища всередині термостата. Дана умова виконується по мірі досягнення парціальним тиском пари води у внутрішньому газовому середовищі значення тиску насиченої пари за даного атмосферного тиску та температури.

Іншою необхідною умовою, яка має певну інерційність, є наявність флуктуації газового середовища в об'ємі обтюратора. Оскільки обтюратор являє собою отвір в термостаті з КПТ, а в даному дослідженні обтюратор зволожувався, то для забезпечення наявності середовища для флуктуацій газу, частина вологи повинна випаруватися. Очевидно для забезпечення як першої відміченої умови, так і другої, необхідний визначений час.

На кінетиці температури складових внутрішнього середовища термостата можна виділити декілька ділянок відділенні одна від одної пунктирними лініями (рис. 3.10). Перша ділянка (I) відповідає досягненню динамічною системою точки біфуркації та «запуску» ефекту ІнТМО, при цьому температура термостата дорівнює 95...96 °С. Після «запуску» ефекту ІнТМО, якому відповідає вихід кінетик температури складових внутрішнього середовища термостата на горизонтальну ділянку, температуру термостата збільшили до 115...116 °С. Збільшенню температури термостата відповідає стрибкоподібна зміна температури на ділянці II. Впродовж третьої ділянки (III) відбувається видалення води із обтюратора з одночасним переходом об'ємної води у внутрішньому середовищі термостата у газовий стан. Про

закінчення рідкої води в обтюраторі свідчить стрибкоподібне його нагрівання до температури близької до температури термостата (IV). П'ята ділянка відповідає переходу об'ємної води у газовий стан при «сухому» обтюраторі (відсутність рідкої води у обтюраторі). Закінченню об'ємної води у внутрішньому виділеному об'ємі термостата та завершенню ефекту ІнТМО відповідає стрибкоподібне збільшення температури газового середовища внутрішньої частини термостата до значення температури термостата (VI).

На ділянках II-V динамічна система «рідина – газ – обтюратор» знаходиться в метастабільному стані за  $p, V = const$ . При цьому на початку третьої ділянки (III) ентальпія внутрішнього середовища термостата дорівнює:

$$I_1 = c_1 m_1 T_1 + r \cdot m_p, \quad (3.20)$$

а в кінці п'ятої ділянки:

$$I_2 = c_2 m_2 T_2, \quad (3.21)$$

де  $c_1, m_1, T_1$  – теплоємність, маса та температура внутрішнього середовища термостата, яке складається з рідини, газу та КПТ обтюратора на початку ІнТМО;

$c_2, m_2, T_1, T_2$  – теплоємність, маса та температура внутрішнього середовища термостата, яке складається з газу та обтюратора на закінченні ефекту ІнТМО;

$m_p$  – маса рідини у виділеному внутрішньому об'ємі термостата;

$r$  – питома теплота пароутворення рідини.

Зміна ентальпії під час ефекту ІнТМО дорівнює:

$$\Delta I = I_2 - I_1. \quad (3.22)$$

При цьому слід вважати, що зміна ентальпії відбувається за рахунок зміни тепловмісту термостата, який значно більший зміни ентальпії, та кінетичної енергії потоку повітря, що рухається відносно обтюратора.

Впродовж проведеного експерименту за температури термостата 115...116 °С, тобто за температури більшої за температуру кипіння об'ємної води, кипіння води у внутрішньому середовищі термостата не відбувалось, що доводить, по-перше, візуальне спостереження, а по-друге, кінетика температури від термопари 3, яка фіксує температуру об'ємної води (температура не перевищувала 97 °С).

Кипіння рідини спостерігається у термостаті за умови відсутності «запуску» ефекту ІнтМО через невиконання будь-яких необхідних умов. Так, якщо температуру термостата з вологим обтюратором підтримувати 115...116 °С, то через відсутність флуктуацій газового середовища в обтюраторі, як описано вище, ефект ІнтМО «блокується» і температура внутрішнього середовища починає прагнути до температури термостата – об'ємна вода закипає. Однак по мірі досягнення необхідних умов для «запуску» ефекту ІнтМО і, відповідно, його «запуску» – кипіння припиняється. Далі ІнтМО протікає відповідно до ділянок III-IV на кінетиці температур з рис. 3.10.

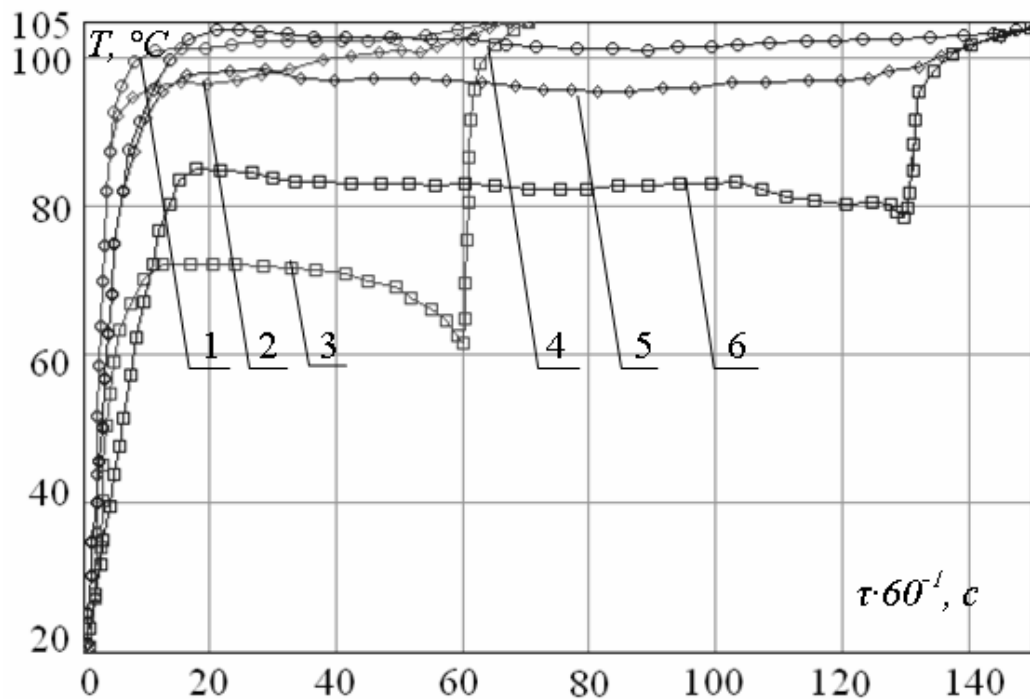
Отриманим результатом встановлена неможливість досягнення об'ємною водою у внутрішньому виділеному об'ємі термостата температури кипіння за умови протікання ефекту ІнтМО.

Такий же результат отриманий і для етилового спирту, і для суміші спирту та води. На рис. 3.11 наведено кінетики температури складових внутрішнього виділеного об'єму термостата (рис. 3.9) під час ІнтМО, де в якості рідкої фази по черзі використовувались етиловий спирт та вода.

Під час експерименту, результати якого наведені на рис. 3.11, обтюратор не зволожували, температуру термостата підтримували рівною

105...106 °С. Як і в попередньому дослідженні ні для спирту, ні для води кипіння не відбувалось.

Кінетика температури складових внутрішнього об'єму термостата під час ефекту ІнтМО, де в якості рідкої фази використовувалась суміш етилового спирту та води у об'ємному співвідношенні 1:1, має такий же характер (рис. 3.12).

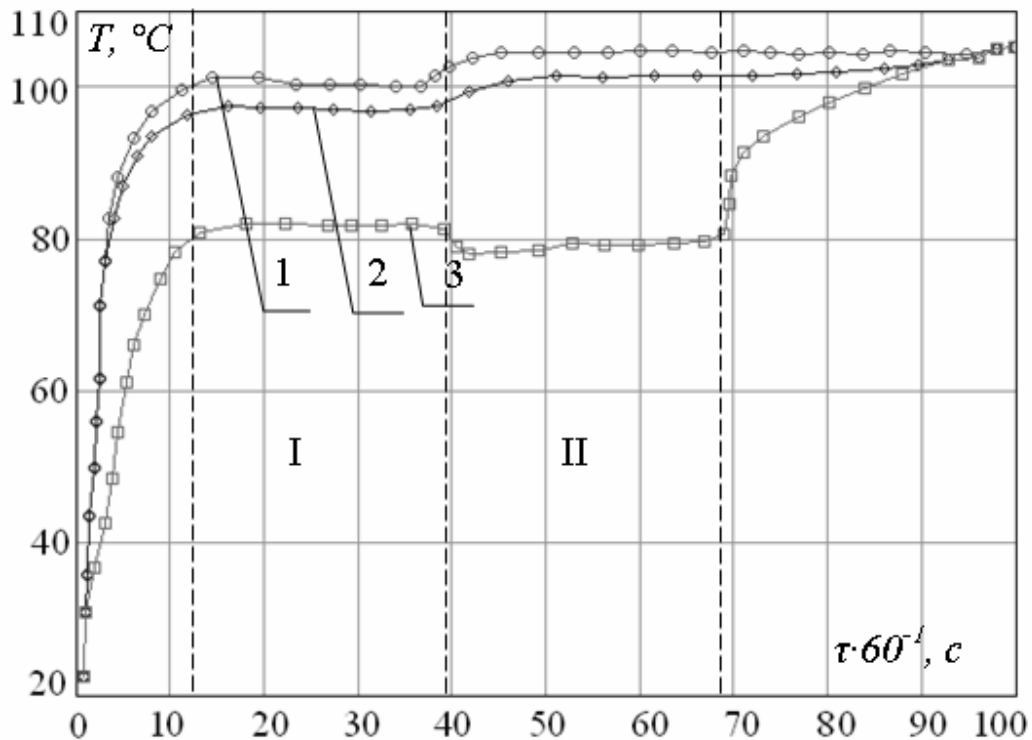


**Рисунок 3.11 – Кінетика температури складових внутрішнього об'єму термостата під час ІнтМО за умови використання в якості рідкої фази: 1, 2, 3 – етилового спирту (відповідно сигнал від термопар 1, 2, 3 з рис. 3.9); 4, 5, 6 – води (відповідно сигнал від термопар 1, 2, 3 з рис. 3.9)**

Однак ділянка кінетики температури рідини у внутрішньому виділеному об'ємі термостата, яка відповідає переходу рідкої фази у газовий стан, має дві частини I та II. Дані частини відрізняються одна від одної значенням температури, при чому перехід між ними відбувається стрибкоподібно. Даний стрибкоподібний перехід відповідає закінченню випаровування етилового спирту у внутрішньому середовищі термостата та початку переходу рідкої води у газовий стан.

Слід відмітити, що для даної суміші під час ІнТМО за температури термостата ( $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) більшої за температуру кипіння даної рідини ( $83\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), кипіння її не відбувалось.

Важливим результатом даного дослідження є встановлення факту, що етиловий спирт та вода переходять до газового стану під час ефекту ІнТМО окремо, при цьому фіксувати видалення рідкої фази компонентів суміші можливо за кінетикою температури рідини.



**Рисунок 3.12** – Кінетика температури складових внутрішнього об'єму термостата під час ефекту ІнТМО за умови використання в якості рідкої фази суміші етилового спирту та води у об'ємному співвідношенні 1:1 (1, 2, 3 – сигнали від термопар з рис. 3.9)

Відзначено, з точки зору практичного застосування ефекту ІнТМО у харчовій промисловості дана особливість може бути використана для таких технологічних операцій як ректифікація, перегонка або дистиляція без фази кипіння. Відмічено, перетин кінетик температури складових внутрішнього середовища термостата є відбиттям їх теплофізичних властивостей, що може

бути використано для експериментального дослідження цих властивостей, а термостат з ефектом ІнТМО – як лабораторне (науково-дослідне) обладнання.

### 3.3.2 Дослідження характеру ефекту індукованого тепломасообміну за наявності твердої, рідкої та газової фаз всередині термостата з розривами між фазами

Моделюванням ІнТМО за наявності твердої, рідкої та газової фаз всередині термостата з розривами між фазами встановлений основний параметр порядку ефекту ІнТМО – наявність суцільності газового середовища за парціальним тиском пари рідини всередині термостата. За умови забезпечення даного параметра порядку ефект ІнТМО можливий навіть при просторовому відділенні сухих речовин і рідини. Моделювання проводились у термостаті, внутрішній об'єм якого складається з двох камер. Схема розміщення термопар та загальний вигляд термостата наведений на рис. 3.13.

Камери одна від одної відділялись алюмінієвою перегородкою (товщина перегородки 4 мм), в якій були виконані отвори. Загальна площа отворів ( $6,3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ ) складала не більше 3% від площі перегородки ( $2,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ ). Верхня камера щільно заповнювалась модельним ККПТ, а нижня частково або повністю заповнювалась водою.

Обтюратори наявні лише в верхній камері внутрішньої частини термостата. Всі стики між стінками були загерметизовані. Єдиним шляхом для масообміну між навколишнім середовищем та внутрішнім середовищем термостата є обтюратори. Вихід води із нижньої камери можливий лише в газовому стані через отвори в перегородці, а до оточуючого середовища лише через ККПТ та обтюратори. Конструкцією нижньої камери передбачений оглядовий отвір та можливість додавати рідину через капіляр безпосередньо під час ТМО.

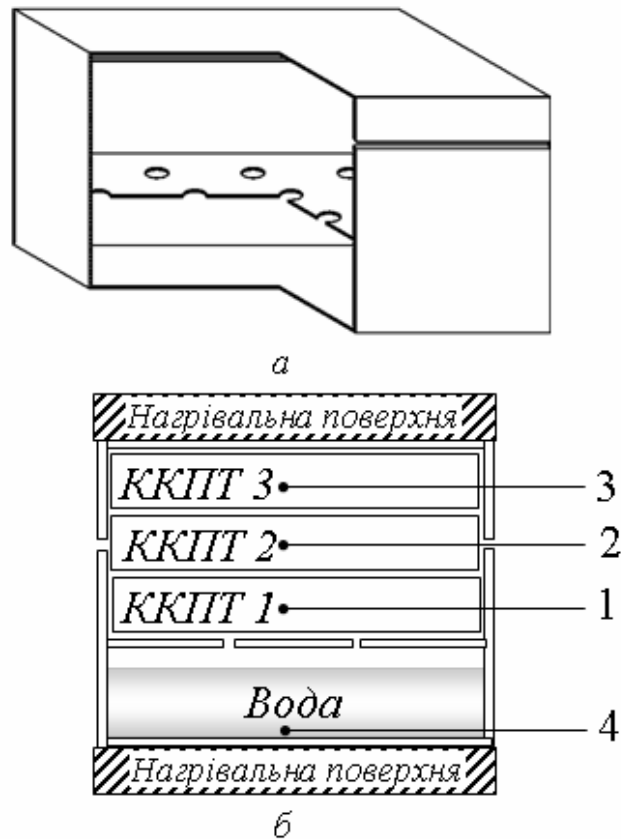
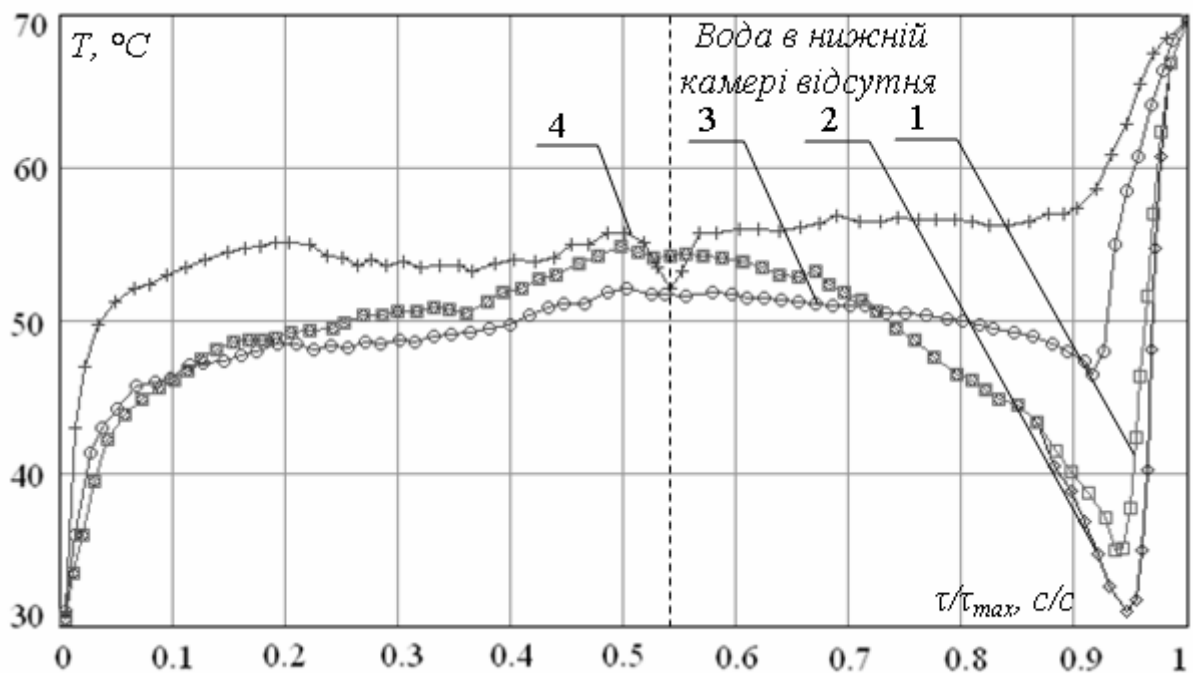


Рисунок 3.13 – Загальний вигляд (а) модуля, що обмежує внутрішню частину термостата з двома камерами та схема розміщення термопар в ньому (б)

Виходячи із спостереження за кількістю води в нижній камері через оглядовий отвір та кінетик температури від різних термопар, наведених на рис. 3.14, кінетика процесу наступна. На початку процесу відбувається нагрівання внутрішнього середовища термостата, яке супроводжується фазовим переходом I-го роду для води, що утримується ККПТ, та води у нижній камері, при цьому кінетика температури ККПТ має прирощення температури не менше нуля, тобто  $dT \geq 0$ .

Очевидно, у нижній камері знаходиться вільна (об'ємна) вода, випаровування якої потребує меншої енергії у порівнянні з водою, що зв'язана тим або іншим механізмом із оточенням. Тому першою починає випаровуватися до внутрішнього середовища вода із нижньої камери та частина системної води ККПТ, яка має ті ж властивості. Кінетика

температури при цьому має горизонтальну ділянку, для якої прирощення температури близьке до нуля –  $dT \approx 0$ . Горизонтальна ділянка обумовлена тим, що кількість води, що переходить в газовий стан за одиницю часу, тобто швидкість випаровування – постійна. Збільшення швидкості випаровування обмежене сталістю площі випаровування та значенням парціального тиску пари води у внутрішньому газовому середовищі термостата, яке асимптотично прагне до тиску насиченої пари за даної температури.



**Рисунок 3.14** – Кінетики температури (пронормовані на загальну тривалість процесу  $\tau_{max}$ ), отримані від різних термопар під час ІнтМО в термостаті, внутрішня частина якого складається з двох камер (рис. 3.13), де 1, 2, 3, 4 – номери термопар

Про повне видалення в термостаті системної води, яка має властивості об'ємної, свідчить локальний мінімум кінетики температури, отриманої від термопари, яка знаходиться у нижній камері (термопара 4 на рис. 3.13 та 3.14). Наявність локального мінімуму (пунктирна лінія на рис. 3.14) пояснюється тим, що по мірі зменшення у нижній камері кількості води, її поверхневий шар, з якого випаровується вода, переміщується та досягає спаю



термопари. Очевидно, температура даного шару через випаровування молекул води – найменша, у порівнянні з шарами води, які знаходяться нижче. Оскільки термопара 4 знаходиться на дні нижньої камери, то локальний мінімум кінетики температури, отриманої від неї, свідчить про закінчення води у даній частині термостата. При цьому закінчується системна вода ККПТ, яка має ті ж властивості, що і об'ємна вода у нижній камері термостата.

Після цього продовжується випаровування частини системної води, яка зв'язана тим, або іншим механізмом з сухими речовинами ККПТ. Випаровування системної води, властивості якої відмінні від властивостей об'ємної води, супроводжується під час ІнТМО утворенням та розвитком дисипативних структур в об'ємі ККПТ всередині термостата в різних місцях, де наявна границя розділу «рідина – газ». Збільшується інтенсивність випаровування системної води з ККПТ, в результаті приріст температури для ККПТ змінює свій знак на від'ємний –  $dT < 0$ . Ефект ІнТМО продовжується до повного випаровування частини системної води, для якої можливий фазовий перехід I роду за даної температури та атмосферного тиску. Система надходить до гігроскопічного стану, якому відповідає локальний мінімум на кінетиках температури ККПТ.

Після досягнення ККПТ гігроскопічного стану, відбувається нагрівання внутрішнього середовища термостата до температури термостата.

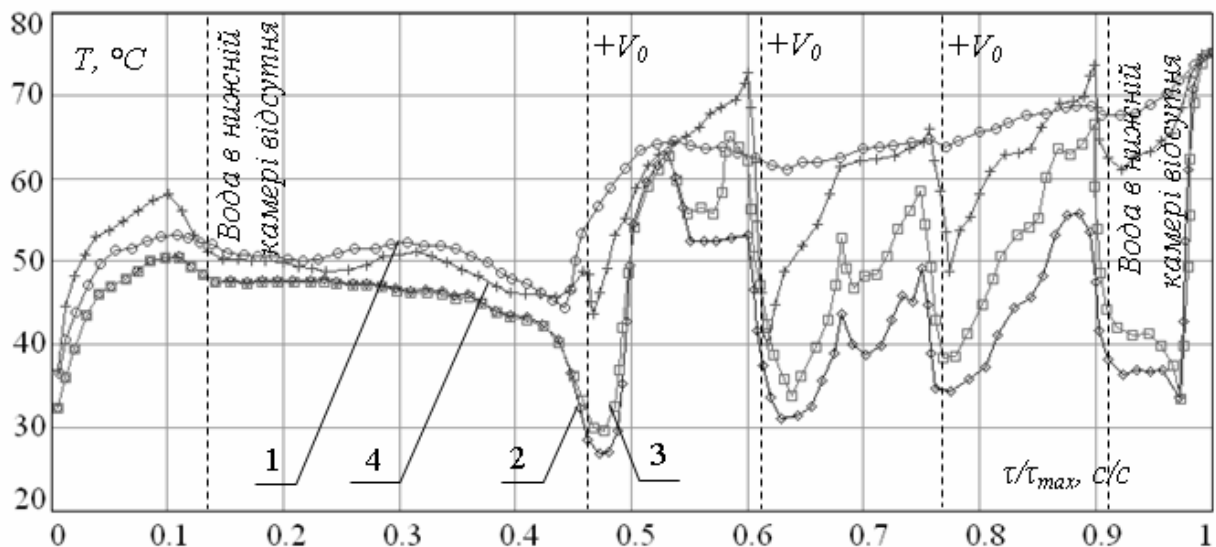
Отриманий результат свідчить про те, що наявність розривів в рідкій та твердій фазах всередині термостата сумірних за розмірами з габаритними розмірами внутрішньої частини термостата не вносить видимих змін у характер протікання ефекту ІнТМО.

Тобто «запуск», «протікання» та «завершення» ефекту ІнТМО можливі навіть за наявності просторового відокремлення рідкої та твердої фаз у внутрішньому виділеному об'ємі термостата за виконання необхідних умов для реалізації даного ефекту. При цьому узагальнюючою необхідною умовою

реалізації ефекту ІнтМО (основний параметр порядку ефекту ІнтМО) є збереження суцільності газового середовища всередині термостата.

Необхідно відзначити, дана особливість ефекту ІнтМО має практичну цінність для здійснення операцій з просторовим відділенням сухих речовин і рідини, таких як ароматизація або одночасна гідротермічна обробка з сушінням, причому за організації ІнтМО в одному універсальному апараті.

Для організації безперервно діючих процесів досліджувався ефект ІнтМО в тому ж термостаті з періодичним додаванням води з постійним об'ємом  $V_0$  у нижню камеру по мірі її випаровування. На рис. 3.15 наведено кінетики температури, отримані при цьому від різних термопар у тому ж термостаті (рис. 3.13). Воду додавали по мірі її закінчення в нижній камері. За рівнем води спостерігали через оглядовий отвір.



**Рисунок 3.15 – Кінетики температури, отримані від різних термопар (1, 2, 3, 4 – термопарі з рис. 3.13) під час ІнтМО в термостаті з періодичним додаванням води об'ємом  $V_0$**

Про закінчення води у нижній камері свідчать характерні стрибкоподібні зміни кінетики температури, отриманої від термопарі 4, спай якої знаходиться в рідкій воді.

Перше додавання води у нижню камеру внутрішньої частини термостата було проведено, коли температура ККПТ досягла локального мінімуму, тобто ККПТ знаходилось в гігроскопічному стані.

Після введення у нижню камеру термостата об'ємної води, її температура починає рости. Об'ємна вода нагрівається і одночасно випаровується, при цьому газове середовище всередині термостата насичується паром води. В той же час, по мірі насичення газового середовища водою, вологовміст ККПТ збільшується, через те, що ККПТ поглинає воду із газового середовища всередині термостата. Температура ККПТ при цьому збільшується.

Після переходу всієї об'ємної системної води в газовий стан та виходу її частини в газовому стані через обтюратори в оточуюче середовище, парціальний тиск пари води у суцільному газовому середовищі всередині термостата зменшується й інтенсивність випаровування системної води ККПТ збільшується за рахунок розвитку дисипативних структур. Температура ККПТ починає зменшуватися до досягнення ним гігроскопічного стану через закінчення частини системної води, для якої можливий фазовий перехід I роду за даних умов.

Необхідно відмітити, що як видно з рис. 3.15, тривалість випаровування доданої в нижню камеру води відрізняється у межах похибки (відстані між пунктирними лініями на рис. 3.15). Отримане свідчить про те, що продуктивність термостата по випаруваній воді постійна і обумовлена продуктивністю обтюратора за даних керуючих параметрів. При цьому продуктивність обтюратора визначається його фізичними властивостями, що є одним із чинників, за допомогою яких можливе керування ефектом ІнТМО під час застосування його на практиці.

Продуктивність обтюратора розраховується за формулою:

$$Pr_{обт} = \frac{\Delta m_p}{S_{обт} \cdot \Delta \tau}, \quad (3.23)$$

де  $\Delta m_p$  – маса рідини, що випарувалась за час  $\Delta \tau$  (с), кг;

$S_{обт}$  – площа зовнішньої поверхні обтюатора (по відношенню до внутрішнього об'єму термостата),  $m^2$ .

Розрахована таким чином продуктивність обтюатора для температури термостата  $75\text{ }^\circ\text{C}$  за умови  $\Delta m_p = 12 \cdot 10^{-3}$  кг;  $\Delta \tau = 3600$  с;

$$S_{обт} = 190 \cdot 10^{-6} m^2 \text{ дорівнює } Pr_{обт} \approx 17 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{m^2 \cdot \text{с}}.$$

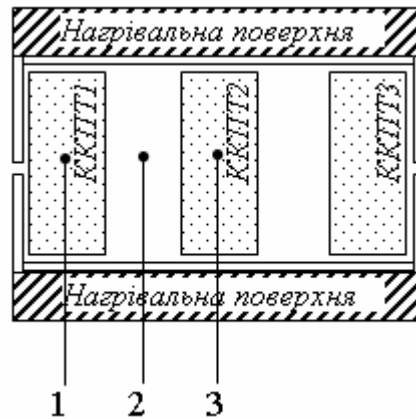
Для порівняння, випаровування води з відкритої поверхні за тієї ж температури без обдування складає  $Pr_{v=0\text{ м/с}} = 3 \cdot 10^{-3} \Big|_{T_m=75^\circ\text{C}} \left( \frac{\text{кг}}{m^2 \cdot \text{с}} \right)$ , а за швидкості  $v = 10$  м/с повітря, що рухається відносно відкритої поверхні рідини –  $Pr_{v=10\text{ м/с}} = 10 \cdot 10^{-3} \Big|_{T_{нов}=75^\circ\text{C}} \left( \frac{\text{кг}}{m^2 \cdot \text{с}} \right)$ .

Таким чином, проведеними розрахунками встановлено, питома продуктивність робочої поверхні термостата з ІнтМО в 1,7 рази більша у порівнянні з продуктивністю випаровування з відкритої поверхні води за тих же температури ( $75\text{ }^\circ\text{C}$ ) та швидкості руху ( $v=10$  м/с) над поверхнею, що вигідно вирізняє ІнтМО.

Моделювання сушіння та гідротермічної обробки з ІнтМО сировини з високою поруватістю або високим ступенем усадки [219] проводилось шляхом створення між шарами ККПТ розривів сумірних з внутрішнім об'ємом термостата (рис. 3.16).

При цьому використовувався термостат наведений на рис. 2.4. Його внутрішній об'єм заповнювали шарами вологого ККПТ з габаритними розмірами  $95 \times 5 \times 22$  мм, як показано на рис. 3.16.

Як видно з рис. 3.16, у внутрішньому об'ємі термостата мають місце розриви об'єму ККПТ. При цьому величина об'єму заповненого тільки газовим суцільним середовищем сумірна з об'ємом шару ККПТ.



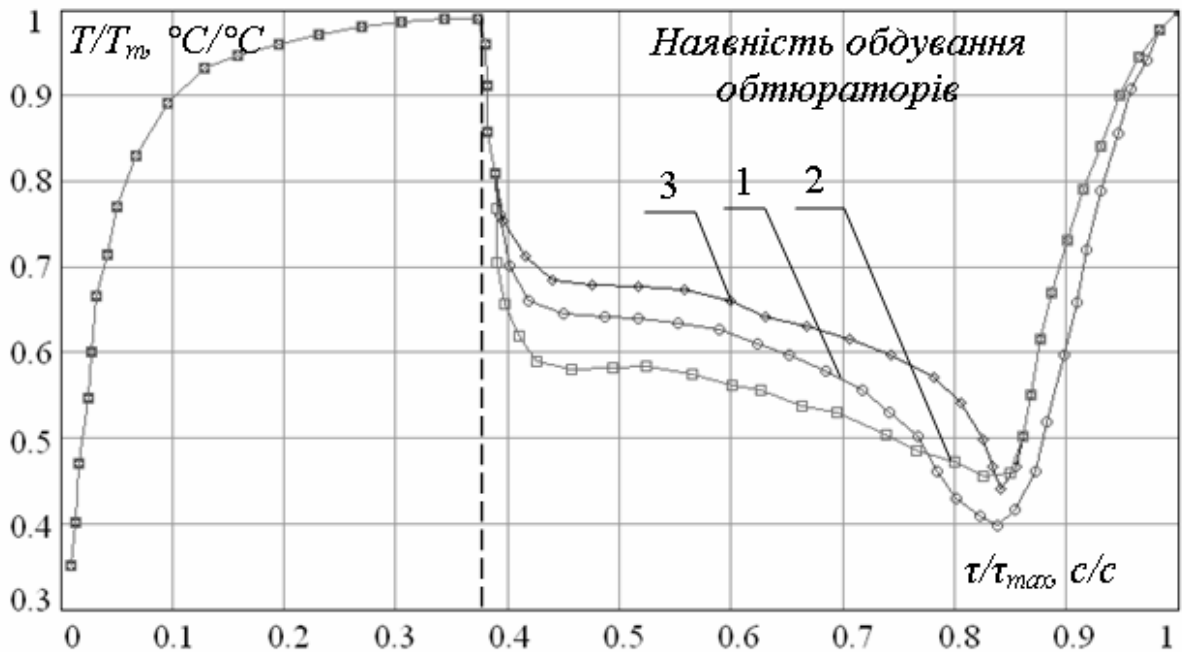
**Рисунок 3.16 – Схема заповнення внутрішньої частини термостата шарами ККПТ під час моделювання ІнТМО в сировині з високою поруватістю або високим ступенем усадки: 1, 2, 3 – термопарі**

За «запуском» та характером «протікання» ефекту ІнТМО стежили за кінетиками температури, які отримували від термопар розміщених у внутрішньому середовищі термостата (рис. 3.16). Експеримент організовувався таким чином, що обдування обтюраторів потоком повітря проводили після досягнення температурою внутрішнього середовища температури термостата, тобто після досягнення системою точки нестійкої рівноваги, яка є точкою біфуркації.

Створення зовнішньої флуктуації приводить до того, що система виходить із стану нестійкої рівноваги та починає рухатись до стану стійкої рівноваги. Кінетики температури суцільного газового середовища (термопара 2) та шарів ККПТ (термопарі 1 та 3), отримані при цьому, наведена на рис. 3.17.

Про «запуск» ефекту ІнТМО, відповідно, свідчить негативне прирощення температури  $dT < 0$ , а про його закінчення – зміна знаку прирощення температури на позитивний  $dT > 0$ . Таким чином, виходячи з виду отриманих кінетик температури (рис. 3.17) характер ефекту ІнТМО за умови наявності розривів в твердій фазі всередині термостата сумірних за розмірами з габаритними розмірами внутрішньої частини термостата не

відрізняється від характеру ефекту ІнтМО за умов відсутності таких розривів.



**Рисунок 3.17 – Кінетика температури (проноормована на загальну тривалість процесу  $\tau_{max}$  та температуру термостата  $T_m$ ) суцільного газового середовища (2) та шарів ККПТ (1, 3) всередині термостата під час ІнтМО, за умов наявності розривів в твердій фазі всередині термостата сумірних за розмірами з габаритними розмірами його внутрішнього виділеного об'єму**

Такий же результат отриманий і під час моделювання обробки з ІнтМО сировини з частинками, що мають газонепроникні включення.

### 3.3.3 Дослідження характеру ефекту індукованого тепломасообміну для сировини з газонепроникними включеннями

Моделювання ефекту ІнтМО для сировини з газонепроникними включеннями [220] проводилось у термостаті, який наведено на рис. 2.4. Площа стінок термостата, що обмежують його внутрішній виділений об'єм, складала –  $7,5 \cdot 10^3 \text{ мм}^2$ , а площа зовнішньої поверхні обтюраторів –  $1,9 \cdot 10^2 \text{ мм}^2$ , тобто співвідношення між площами дорівнює 40:1. Три

прямокутні шари ККПТ розміром  $95 \times 5 \times 22$  мм розміщувались паралельно нагрівальним поверхням як показано на рис. 3.18.

Між шарами ККПТ штучно створювались границі розділу із паронепроникного матеріалу. Для створення таких границь між шарами використовувалась алюмінієва фольга у вигляді прямокутних листків площею  $95 \times 22$  мм. Товщина алюмінієвої фольги дорівнювала 0,02 мм.



**Рисунок 3.18 – Схема розміщення термодатчиків та листів алюмінієвої фольги між шарами ККПТ під час моделювання ІнтМО за горизонтальної орієнтації сировини з газонепроникними включеннями (1, 2, 3 – термодатчики у відповідних шарах ККПТ)**

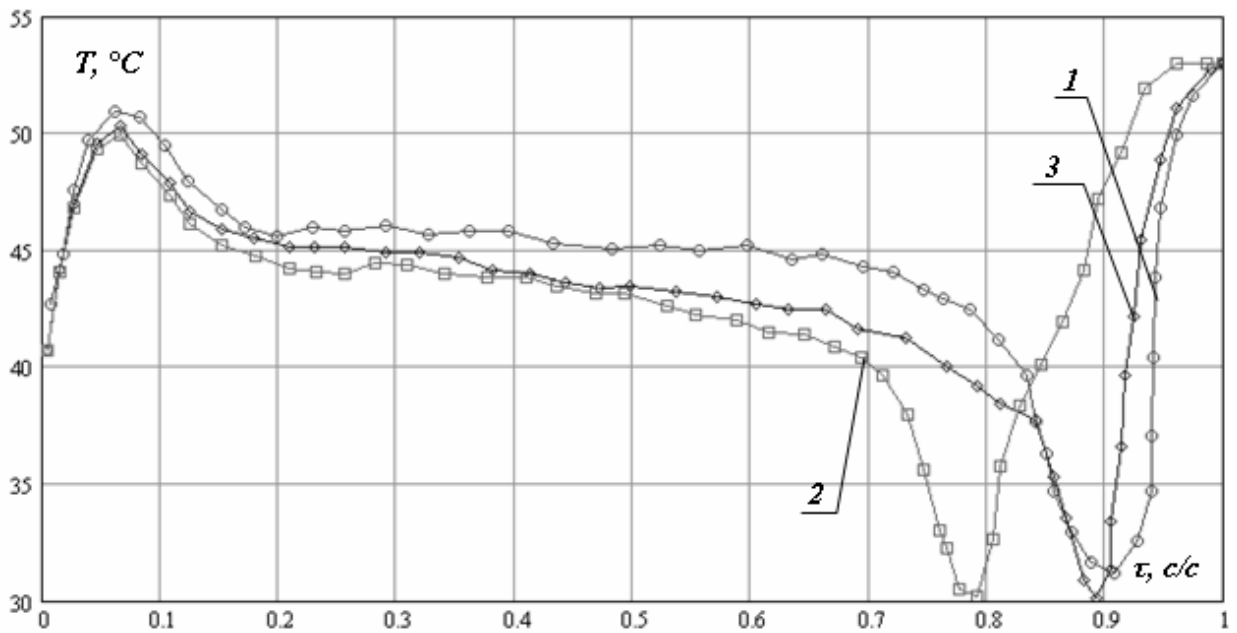
Очевидно, проникнення газу або рідини між шарами можливе лише через щілини між внутрішньою поверхнею стінок термостата, що обмежують його внутрішній виділений об'єм та краями листків фольги. Один шар ККПТ (ККПТ 2) контактує з оточуючим середовищем через зазори в стінках термостата. Функції обтюратора виконує частина даного шару ККПТ, яка безпосередньо прилягає до зазору.

На рис. 3.19 наведено кінетику температури шарів ККПТ під час ефекту ІнтМО за даної організації експерименту.

Кінетики температури для різних шарів ККПТ мають типовий для ефекту ІнтМО характер: нагрівання ККПТ та досягнення локального максимуму температури, який відповідає точці біфуркації; зменшення температури з часом та досягнення локального мінімуму температури; нагрівання до температури термостата. Локальний мінімум температури

відповідає досягненню модельним ККПТ гігроскопічного стану, що відповідає кінцевому періоду процесу ТМО в термостаті.

Як видно з рис. 3.19, першим локальним мінімумом температури, який відповідає гігроскопічному стану ККПТ, досягає шар ККПТ 2. Одночасно з цим, для кінетик температури шарів ККПТ 1 та ККПТ 3 має місце різка зміна кута їх нахилу до осі, на якій відкладено тривалість ІнТМО. Через 0,1 частку від загальної тривалості процесу локальних мінімумів досягають також кінетики температури шарів ККПТ 1 та ККПТ 2, тобто ці шари також досягають гігроскопічного стану. Далі внутрішнє середовище нагрівається до температури термостата. Виходячи з результату експерименту видно: різні шари досягли рівноважного вологовмісту з різницею тривалості в 10% від загальної тривалості процесу ТМО, хоча між ними був розміщений паронепроникний бар'єр.

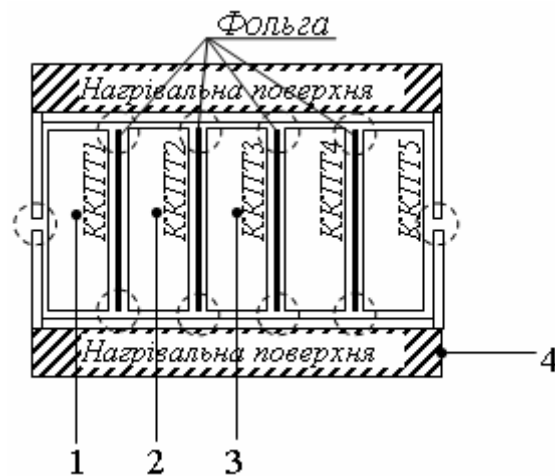


**Рисунок 3.19 – Кінетика температури (пронормована на загальну тривалість процесу  $\tau_{max}$ ) шарів ККПТ під час моделювання ефекту ІнТМО за горизонтальної орієнтації сировини з газонепроникними включеннями: 1 – ККПТ 1; 2 – ККПТ 2; 3 – ККПТ 3**



Отримане підтверджує феноменологічну гіпотезу ефекту ІнтМО та доводить, що границя розділу «навколишнє середовище – внутрішнє середовище термостата» знаходиться в об'ємі обтюратора, а газове середовище всередині термостата є суцільним.

Моделювання ефекту ІнтМО за горизонтальної орієнтації сировини з газонепроникними включеннями проводилось шляхом вертикального розміщення бар'єрів між шарами ККПТ. Всього було розміщено п'ять шарів ККПТ, між якими розміщували листки фольги прямокутної форми, як наведено на рис. 3.20.



**Рисунок 3.20 – Схема розміщення термопар та листів алюмінієвої фольги між шарами ККПТ під час моделювання ефекту ІнтМО за вертикальної орієнтації сировини з газонепроникними включеннями: 1, 2, 3, 4 – термопарі**

Фазові портрети ефекту ІнтМО для трьох шарів, отримані при цьому, наведені на рис. 3.21. Фазові портрети отримувались лише для трьох шарів, оскільки, як доведено роботами [143] з дослідження даного ефекту, має місце площинна симетрія ІнтМО у тепломасообмінному модулі в формі паралелепіпеду, який обмежує внутрішній об'єм термостата, за однакових зовнішніх умов на стінках з обтюраторами. Тобто, очевидно, фазові портрети ефекту ІнтМО для шарів ККПТ 1 та ККПТ 5 співпадають, те ж стосується і шарів ККПТ 2 та ККПТ 4.

За такої організації структури внутрішнього середовища термостата, тобто за такого розміщення ККПТ та елементів газонепроникного матеріалу фазові портрети ефекту ІнТМО мають певні особливості (рис. 3.21).

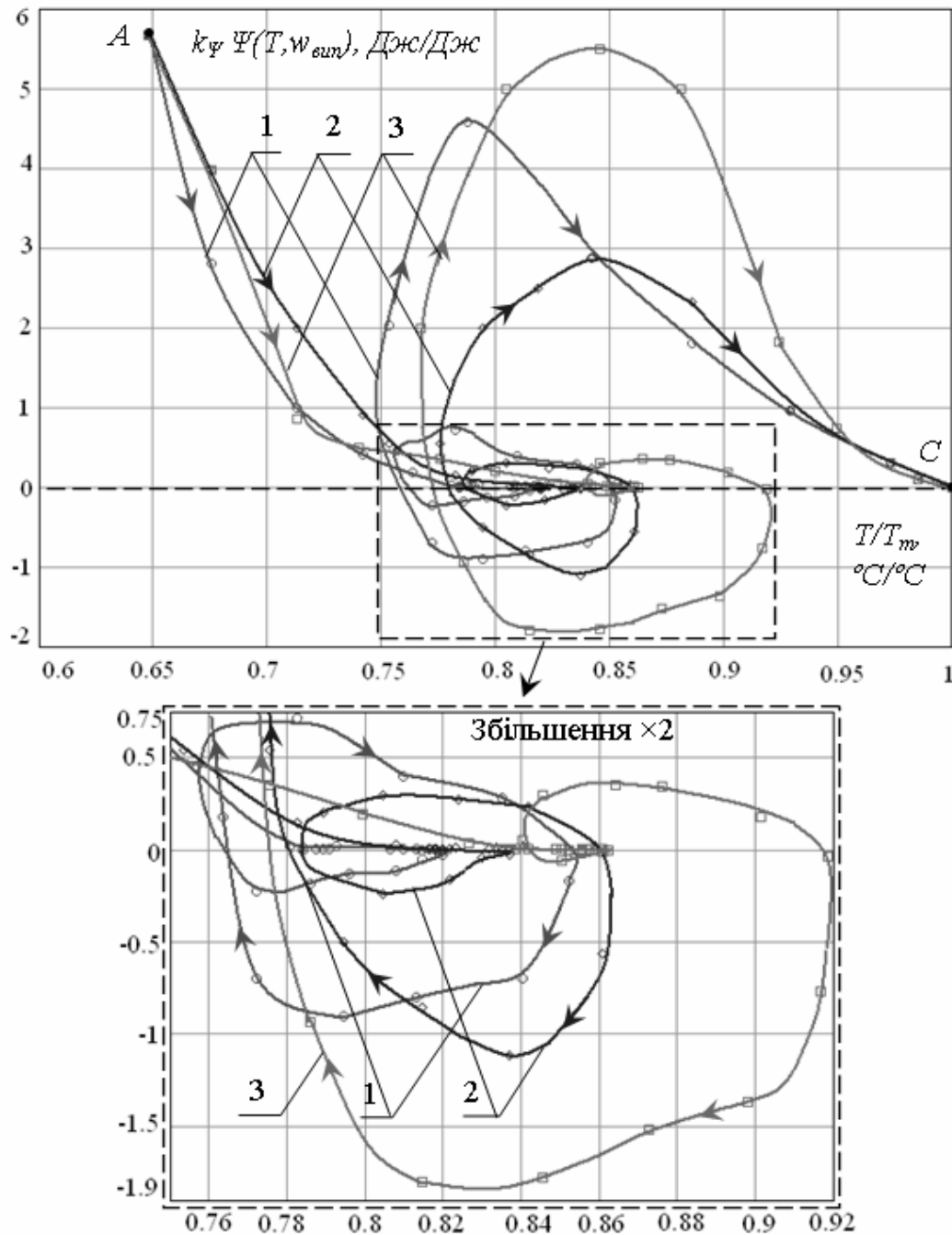


Рисунок 3.21 – Фазові портрети ефекту ІнТМО за вертикальної орієнтації сировини з газонепроникними включеннями: 1 – ККПТ 1, ККПТ 5; 2 – ККПТ 2, ККПТ 4; 3 – ККПТ 3 (з рис. 3.20)

Основною відмінністю наведених фазових портретів, від фазових портретів, наведених вище для інших реалізацій ефекту ІнТМО, є наявність двох петель з частиною фазової траєкторії у негативній області площини з координатами  $k_{\Psi} \cdot \Psi(T, w_{sun})$  та  $T/T_m$ .

Для такої організації структури внутрішнього середовища термостата має місце розділення системи на підсистеми. Роль обтюраторів у даному дослідженні виконують частини ККПТ, які прилягають до зазору між паронепроникними частинами термостата (позначені обведенням на рис. 3.20). Тобто на границі внутрішнього середовища термостата з навколишнім середовищем паронепроникними частинами є стінки тепломасообмінного модуля, що обмежують внутрішній об'єм термостата, на поверхні яких зроблений зазор. У внутрішньому середовищі такими паронепроникними стінками є внутрішня частина стінок термостата та листки алюмінієвої фольги, а функції зазорів виконують щілини між листками фольги та стінками термостата.

Таким чином, термостат з розміщеними всередині нього шарами ККПТ та листками алюмінієвої фольги, як наведено на рис. 3.20, можна, з точки зору масообміну, розглядати, як послідовно та паралельно поєднані між собою умовні термостати. Умовна еквівалентна схема такого з'єднання термостатів наведена на рис. 3.22.

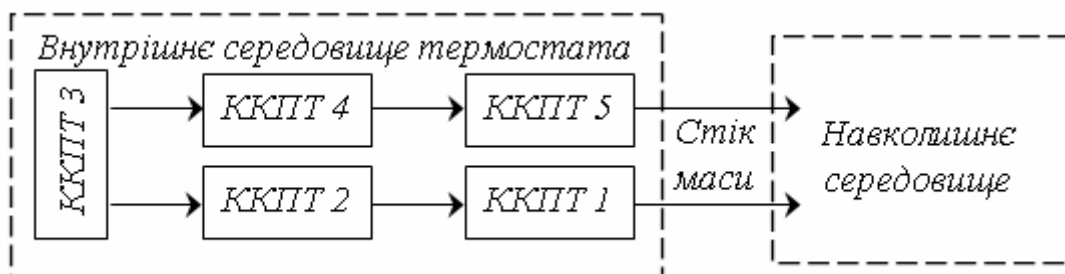


Рисунок 3.22 – Еквівалентна схема внутрішньої частини термостата з рис. 3.20

Виникнення флуктуації об'ємної концентрації молекул води внутрішнього суцільного газового середовища термостата в обтюраторі на границі розділу «оточуюче середовище – внутрішнє середовище термостата» спричиняє флуктуацію концентрації молекул води суцільного газового середовища всередині термостата, а, відповідно, і в обтюраторах на границі розділу між умовними термостатами. Виходячи з цього, «запуск», «зрив», «протікання» або «закінчення» ефекту ІнтМО в будь-якому із умовних термостатів буде відбиватися на характері протікання ТМО у всій системі. Дане ствердження наочно підтверджують фазові портрети наведені на рис. 3.21.

На наведених фазових портретах ефекту ІнтМО, як відмічено вище, мають місце для кожного шару ККПТ (умовного термостата) дві петлі з частиною фазової траєкторії у другій чверті фазової площини, яка має негативний знак за координатою  $k_{\psi} \cdot \Psi(T, w_{sun})$ . Дана частина фазової траєкторії (у негативній площині) відповідає протіканню ефекту ІнтМО. При цьому слід вважати, що перша петля має місце через «запуск», «протікання» та «закінчення» ефекту ІнтМО очевидно у шарах, обтюратори яких знаходяться на границі розділу «оточуюче середовище – внутрішнє середовище термостата», тобто у шарах ККПТ 1 та ККПТ 5. Друга петля має місце через перебіг ефекту ІнтМО у внутрішніх умовних термостатах, тобто у шарах – ККПТ 2, ККПТ 3, ККПТ 4.

За даних умов організації експерименту, а саме, за даної організації структури внутрішнього середовища термостата (послідовне з'єднання умовних термостатів), за даних властивостей матеріалу, який використовується як обтюратор і ККПТ та за даної енергії потоку повітря, що рухається відносно обтюраторів, має місце розщеплення фазового портрету ефекту ІнтМО в даній динамічній системі.

Наявність дворівневого розщеплення (відсутність тривірневого розщеплення) за умови трьох послідовно з'єднаних умовних термостатів пояснюється наступним чином. У відповідності до запропонованої

феноменологічної гіпотези (розд. 2), потік маси в об'ємі обтюраторів «індукується» часовою  $\left(\frac{\partial x_{ind}}{\partial \tau}\right)$  і просторовою  $\left(\frac{\partial \langle n_{ind} \rangle}{\partial x_{ind}}\right)$  флуктуаціями (з виразів (2.24) і (2.29)), граничні значення яких обумовлені енергією активації ефекту ІнтМО. Під час послідовного переходу між умовними термостатами потужність флуктуацій зменшується через дисипацію їх величин в об'ємі термостата. Очевидно, за умови зменшення в об'ємі чергового обтюратора, як часової, так і просторової флуктуацій відносно граничних значень, необхідних для «запуску» і «протікання» ефекту ІнтМО, ефект ІнтМО в даному черговому умовному термостаті не «запускається». Відповідно, у даному черговому обтюраторі «запуск» ІнтМО можливий лише за виконання необхідних умов для його реалізації.

За одним із шляхів еволюції системи за постійного зовнішнього впливу на неї, необхідні умови для «запуску» або повторного «запуску» ефекту ІнтМО в умовному черговому термостаті із послідовної низки починають виконуватись через зменшення дисипації потужності флуктуацій у попередніх умовних термостатах. Дисипація часової та просторової флуктуацій може зменшуватись через зменшення кількості рідкої фази, для якої можливий фазовий перехід I роду за даних умов. Саме цей шлях еволюції системи наведений на фазовому портреті на рис. 3.21.

Іншим шляхом «запуску» ефекту ІнтМО в умовному черговому термостаті із послідовної низки є зміна зовнішнього впливу на систему, таким чином, щоб необхідні вимоги почали виконуватись. Одним із способів є збільшення роботи потоку повітря оточуючого середовища, що рухається відносно зовнішньої поверхні обтюратора. Однак збільшення енергії потоку може порушити необхідні умови, що висувуються до властивостей обтюратора (2.1)-(2.2), крім того тягне за собою додаткові енерговитрати. Таким чином, під час будь-якого зовнішнього впливу на систему для реалізації ефекту ІнтМО повинні виконуватись необхідні умови для його протікання.

Характер протікання ефекту ІнтМО у даному дослідженні однаковий для всіх окремих об'ємів внутрішнього об'єма термостата, причому особливі точки для них синхронні. Отримане доводить, що під час ефекту ІнтМО має місце «спрямованість» характеру протікання процесу ТМО. Під «спрямованістю» розуміється те, що особливості перетікання процесу будь-якого виділеного об'єму внутрішнього середовища термостата відбивається на характері його перетікання для інших виділених об'ємів. Така поведінка характерна тільки для суцільного середовища. Необхідно відмітити, наявність «спрямованості» процесу ТМО, ще одна ознака «штучності» та керованості ефекту ІнтМО, яка розширює потенціальні можливості використання даного способу на практиці. Використати дану особливість ефекту ІнтМО можливо для виконання технологічних операцій з обробки різної сировини в одному апараті без його змішування.

#### 3.3.4 Кінетика температури колоїдного капілярно-пористого тіла під час індукованого тепломасообміну як функція температури термостата

В попередніх розділах відмічено, що кінетика температури під час ІнтМО має визначений характер: наявні відповідні локальні екстремуми. При цьому важливим є те, що вони мають місце за наявності всередині термостата сухих речовин (у загальному випадку ККПТ), рідкої та газової фаз. Таким чином, під час дослідження кінетики температури під час ІнтМО, об'єм термостата заповнювали вологим ККПТ. Рідка вода та пароповітряна суміш утримувались в порожнинах між частинами ККПТ, а також в його порах та капілярах.

Для отримання кінетики температури сировини під час ІнтМО в залежності від рівноважної температури термостата в його геометричному центрі розміщувалась термопара [221]. Температура термостата змінювалась дискретно від 40 до 100 °С з інтервалом 5 °С. Використовувалась паралелепіпедна форма внутрішнього об'єму термостата з розмірами

20×100×100 мм. Кінетика температури ККПТ під час ІнТМО за різної температури термостата наведена на рис. 3.23.

Апроксимаційні функції для отриманих залежностей мають вид:

$$f_{T_m}(\tau) = \left( a0_{T_m} \cdot \exp\left(-\frac{(\tau - a1_{T_m})^2}{a2_{T_m}}\right) - a5_{T_m} \left( \exp(-\tau^2 \cdot a3_{T_m}) + 1 \right) \right) \cdot a4_{T_m}, \quad (3.24)$$

де  $a0_{T_m}$  ( $^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$ ),  $a1_{T_m}$  (с),  $a2_{T_m}$  ( $\text{с}^2$ ),  $a3_{T_m}$  ( $\text{с}^{-2}$ ),  $a4_{T_m}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $a5_{T_m}$  ( $^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$ ) – апроксимаційні коефіцієнти.

Апроксимаційні функції для кінетики температури за різної температури термостата мають однаковий вид, але різні значення апроксимаційних коефіцієнтів.

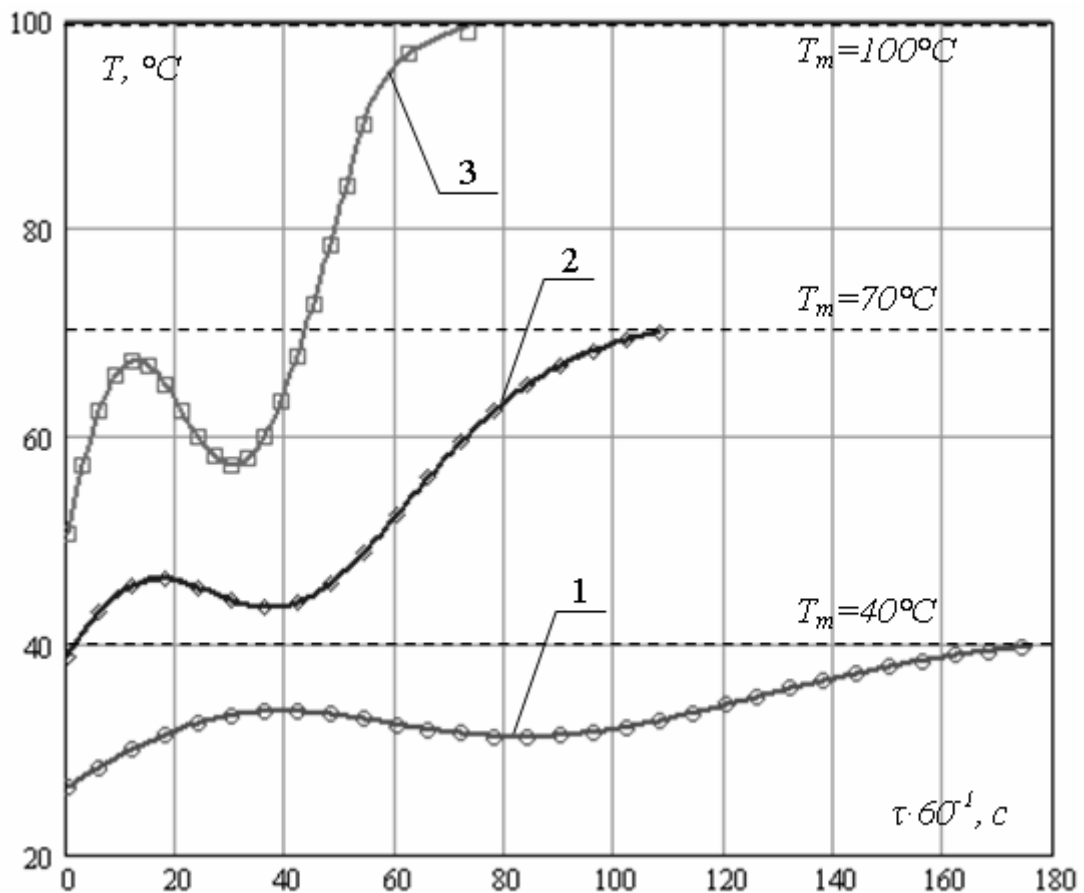


Рисунок 3.23 – Кінетика температури ККПТ під час ІнТМО за різної температури термостата,  $^{\circ}\text{C}$ : 1 – 40; 2 – 70; 3 – 100

Для розрахованих за різної рівноважної температури термостата  $T_m$  апроксимаційних коефіцієнтів також були отримані апроксимаційні функції, які представляють собою лінійні та експоненціальні залежності:

$$\begin{aligned} a0_T(T_m) &= a00_T + a01_T \cdot T_m, \\ a1_T(T_m) &= a10_T \cdot \exp(a11_T \cdot T_m), \\ a2_T(T_m) &= a20_T \cdot \exp(a21_T \cdot T_m), \\ a3_T(T_m) &= a30_T + a31_T \cdot T_m, \\ a4_T(T_m) &= a40_T \cdot \exp(a41_T \cdot T_m), \end{aligned} \quad (3.25)$$

де  $a00_T = 0.952$  ( $^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$ ),  $a01_T = -5.267 \cdot 10^{-3}$  ( $1/^{\circ}\text{C}$ );

$a10_T = 26.855$  (с),  $a11_T = -0.011$  ( $1/^{\circ}\text{C}$ );

$a20_T = 1.074 \cdot 10^4$  ( $\text{c}^2$ ),  $a21_T = -0.033$  ( $1/^{\circ}\text{C}$ );

$a30_T = 7.044 \cdot 10^{-5}$  ( $\text{c}^{-2}$ ),  $a31_T = 7.044 \cdot 10^{-5}$  ( $\text{c}^{-2}/^{\circ}\text{C}$ );

$a40_T = 16.21$  ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $a41_T = 0.022$  ( $1/^{\circ}\text{C}$ ).

Таким чином, якщо врахувати (3.25) – апроксимаційна функція (3.24) є функцією двох аргументів: температури термостата та часу.

### 3.3.5 Кінетика температури колоїдного капілярно-пористого тіла у термостаті під час індукованого тепломасообміну як функція координат

Під час досліджень зі знаходження аналітичного виду кінетики температури як функції координат використовували ТМО-модуль, що має форму паралелепіпеду з характерними розмірами  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$  та який обмежує внутрішній виділений об'єм термостата (рис. 3.24) [222, 223].

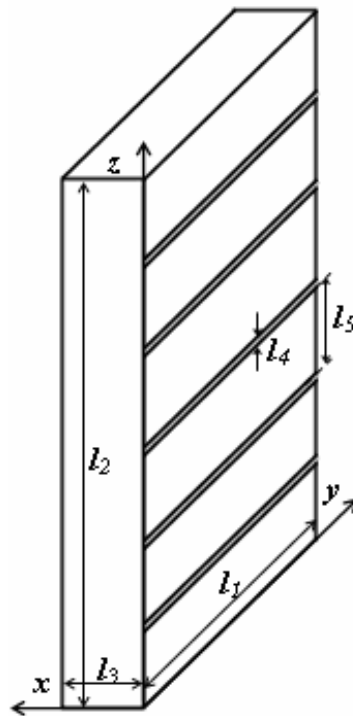
Характерні розміри  $l_1$  та  $l_2$  були принаймні на порядок більші ніж  $l_3$ . Обтюратори розміщені на гранях  $l_1 \times l_2$ , а грань  $l_3 \times l_2$  перпендикулярна до потоку повітря, що рухається відносно зовнішньої поверхні обтюратора.



Характерний розмір  $l_3$  дорівнював 20 мм. Термостатування забезпечувалось потоком повітря, що рухається відносно обтюратора та омиває ТМО-модуль. Температура повітря дорівнювала температурі термостата.

Направимо осі координат вздовж ребер ТМО-модуля, який обмежує внутрішній об'єм термостата, як показано на рис. 3.24. Для отримання кінетики температури ККПТ під час ІнтМО вздовж кожної осі всередині ТМО-модуля розміщали термопари на відстані 5 мм одна від одної.

В ході експериментальних досліджень встановлено, що перепад температур вздовж осі  $Oy$  за постійних значень координат  $z$  та  $x$  не суттєвий. Найбільша різниця температур вздовж вище означеної осі спостерігається на початковому етапі під час прогрівання ККПТ, при цьому вона не перебільшує 10% від загальної тривалості процесу.



**Рисунок 3.24 – ТМО-модуль у формі паралелепіпеду з розмірами  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$ , який обмежує внутрішній виділений об'єм термостата**

Той же самий результат отриманий і під час дослідження різниці температур вздовж осі  $Oz$ . Пояснюється отримане тим, що, оскільки,

теплообмін на площинах  $l_2 \times l_3$  та  $l_1 \times l_3$  не ускладнений масообміном, через відсутність на поверхні термостата обтюраторів, то перепади температур вздовж осей  $Oy$  та  $Oz$  обумовлені теплопровідністю ККПТ і виникають лише під час його підігріву.

Таким чином, далі було зроблено припущення, що вздовж осей  $Oy$  та  $Oz$  перепад температур не суттєвий і залежність кінетики температури ККПТ від координат досліджувалась лише вздовж осі  $Ox$ .

На рис. 3.25 наведено кінетику температури ККПТ під час ІнтМО на різній відстані від внутрішньої стінки термостата. Нуль відліку координатної осі  $Ox$  знаходиться під поверхнею внутрішньої стінки термостата. Крива кінетики температури (1) показує температуру під поверхнею стінки, тобто на відстані 0 мм, друга (2) – на відстані 5 мм, а третя – 10 мм від поверхні. По іншу сторону від середини товщини модуля, тобто на відстані 15 та 20 мм від початку осі  $Ox$ , кінетики температур мають той же характер та ті ж значення, що й на відстані, відповідно, 5 та 0 мм.

Температура на рис. 3.25 пронормована на значення температури термостата, оскільки попередніми дослідженнями встановлено, що кінетика температури всередині ККПТ за різної відстані від внутрішньої поверхні термостата для різних температур його стінок має однаковий характер. Для знаходження абсолютних значень температури сировини під час ІнтМО необхідно помножити наведені значення на температуру термостата.

З наведених результатів видно, що за наближення до центру ТМО-модуля, який обмежує внутрішній об'єм термостата, мінімум температури зміщується відносно осі, на якій відкладено час, в сторону менших його значень, при цьому значення температури, яке відповідає мінімуму кінетики – зменшується, тобто збільшується різниця температур ККПТ – внутрішня стінка термостата.

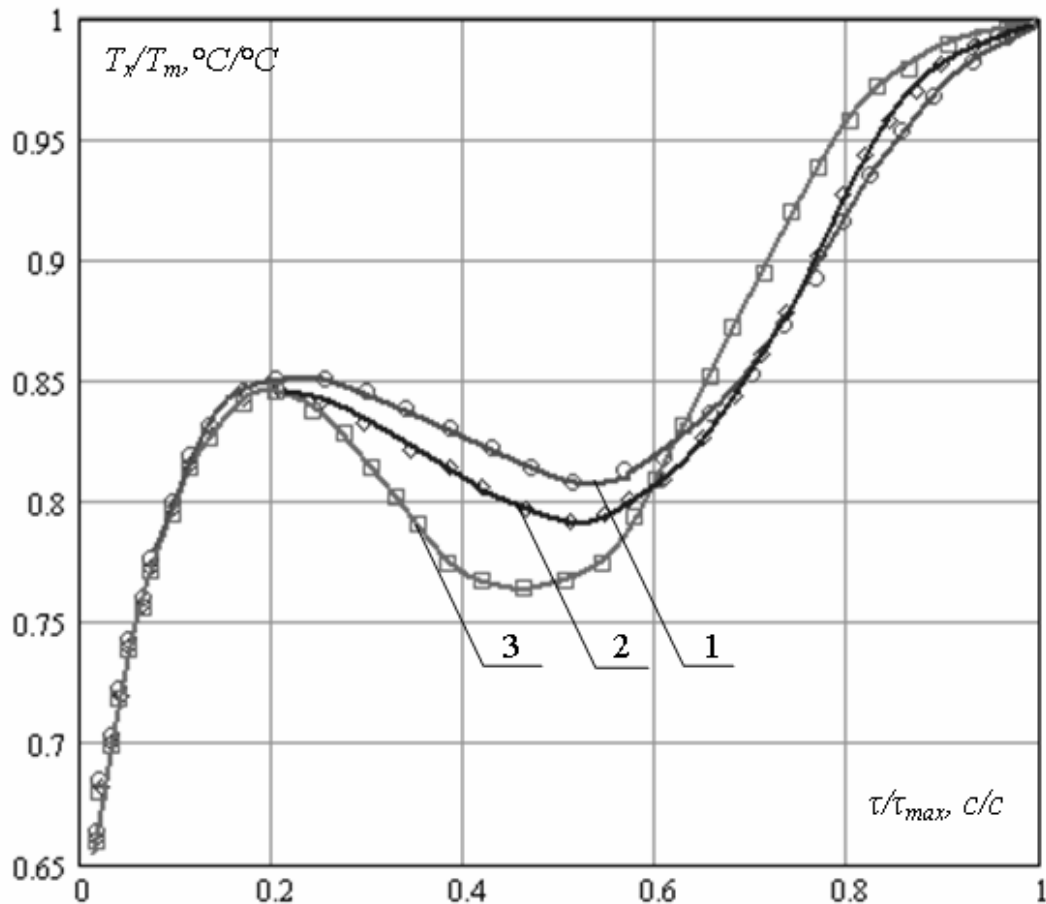


Рисунок 3.25 – Кінетика температури ККПТ (пронормована на загальну тривалість процесу  $\tau_{max}$  та температуру термостата  $T_m$ ) під час ІнтМО на різній відстані від внутрішньої стінки термостата вздовж осі  $Ox$ , мм: 1 – 0; 2 – 5; 3 – 10

Апроксимація експериментальних даних проводилась функцією виду:

$$f_x(\tau) = \left( a0_x \cdot \exp\left(-\frac{(\tau - a1_x)^2}{a2_x}\right) - a5_x (\exp(-\tau^2 \cdot a3_x) + 1) \right) \cdot a4_x, \quad (3.26)$$

де  $a0_x$  ( $^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$ ),  $a1_x$  (м),  $a2_x$  ( $\text{м}^2$ ),  $a3_x$  ( $\text{м}^{-2}$ ),  $a4_x$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) та  $a5_x$  ( $^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$ ) – апроксимаційні коефіцієнти.

Апроксимаційні функції для кінетики температури ККПТ на різній відстані від внутрішньої стінки термостата мають однаковий вид, але різні значення апроксимаційних коефіцієнтів.

Для розрахованих за різної відстані від внутрішньої стінки термостата апроксимаційних коефіцієнтів також були отримані апроксимаційні функції, які мають вид:

$$a_{i_x}(x) = ci_0 \cdot \exp\left(-\frac{(x - ci_1)^2}{ci_2}\right) + ci_3, \quad (3.27)$$

де  $x$  – відстань від внутрішньої стінки термостата вздовж осі  $Ox$ ;

$i=0, 1, 2, 3, 4$  – номер апроксимаційного коефіцієнта  $ai$  із формули (3.26);

$ci_0, ci_1, ci_2$  та  $ci_3$  – апроксимаційні коефіцієнти, значення яких наведено в табл. 3.5.

Функції (3.24) та (3.26) мають однаковий вид, але відрізняються вони набором аргументів: аргументами функції (3.24) є час та температура термостата, а функції (3.26), враховуючи те, що апроксимаційні коефіцієнти (3.27) залежать від відстані від внутрішньої стінки термостата, – відстань від стінки та час.

**Таблиця 3.5**

**Значення апроксимаційних коефіцієнтів для формули (3.22)**

	$ci_0$	$ci_1$	$ci_2$	$ci_3$
$a0_x$	0,02 (°C/°C)	$10 \cdot 10^{-3}$ (м)	$30 \cdot 10^{-6}$ (м <sup>2</sup> )	0,73 (°C/°C)
$a1_x$	$-0,007 \cdot 10^{-3}$ (м)	$10 \cdot 10^{-3}$ (м)	$32 \cdot 10^{-6}$ (м <sup>2</sup> )	$0,117 \cdot 10^{-3}$ (м)
$a2_x$	$-0,043 \cdot 10^{-6}$ (м <sup>2</sup> )	$10 \cdot 10^{-3}$ (м)	$30 \cdot 10^{-6}$ (м <sup>2</sup> )	$0,133 \cdot 10^{-6}$ (м <sup>2</sup> )
$a3_x$	$0,8 \cdot 10^{-6}$ (м <sup>-2</sup> )	$10 \cdot 10^{-3}$ (м)	$25 \cdot 10^{-6}$ (м <sup>2</sup> )	$3 \cdot 10^{-6}$ (м <sup>-2</sup> )
$a4_x$	-0,027 (°C)	$10 \cdot 10^{-3}$ (м)	$30 \cdot 10^{-6}$ (м <sup>2</sup> )	1,05 (°C)

Якщо навести відповідну кореляцію між коефіцієнтами (3.25) та (3.27), то для коефіцієнтів (3.27) можна отримати наступні залежності від координати та температури термостата:

$$\begin{aligned}
a_0(x, T_m) &= \frac{0.73}{0.75} \cdot a_{0T}(T_m) + \\
&+ \left( -3.669 \cdot 10^{-4} + 0.028 \cdot a_{0T}(T_m) \right) \cdot \exp\left( -\frac{(x-10)^2}{30} \right), \\
a_1(x, T_m) &= \frac{0.117}{0.11} \cdot a_{1T}(T_m) + \\
&+ \left( 0.03 - 0.068 \cdot a_{1T}(T_m) \right) \cdot \exp\left( -\frac{(x-10)^2}{32} \right), \\
a_2(x, T_m) &= \frac{0.133}{0.09} \cdot a_{2T}(T_m) + \\
&+ \left( 0.449 - 0.482 \cdot a_{2T}(T_m) \right) \cdot \exp\left( -\frac{(x-10)^2}{30} \right), \\
a_3(x, T_m) &= \frac{3}{3.8} \cdot a_{3T}(T_m) + \\
&+ \left( 8.823 \cdot 10^{-7} + 0.205 \cdot a_{3T}(T_m) \right) \cdot \exp\left( -\frac{(x-10)^2}{25} \right), \\
a_4(x, T_m) &= \frac{1.05}{1.023} \cdot a_{4T}(T_m) + \\
&+ \left( 0.019 - 0.027 \cdot a_{4T}(T_m) \right) \cdot \exp\left( -\frac{(x-10)^2}{30} \right). \tag{3.28}
\end{aligned}$$

Далі підставимо отримані коефіцієнти в функцію (3.24) та отримаємо апроксимаційну функцію для кінетики температури ККПТ аргументами якої є час, температура стінки термостата та координата:

$$\begin{aligned}
T(\tau, x, T_m) &= \left[ a_0(x, T_m) \cdot \exp\left( -\frac{(\tau - a_1(x, T_m))^2}{a_2(x, T_m)} \right) - \right. \\
&\left. - \exp\left( -\tau^2 \cdot a_3(x, T_m) \right) + 1 \right] \times a_4(x, T_m). \tag{3.29}
\end{aligned}$$

Отримана функція використовується для знаходження фазових траєкторій системи і пошуку раціональних режимів ефекту ІнТМО та конструкторських рішень щодо геометрії внутрішньої частини термостата.

3.3.6 Кінетика вологовмісту колоїдного капілярно-пористого тіла під час індукованого тепломасообміну як функція температури термостата та відстані від його внутрішньої стінки

Під час знаходження аналітичного виду функції, що описує кінетику вологовмісту ККПТ в залежності від температури термостата та відстані від його внутрішньої стінки [224, 225], дотримувались тієї ж схеми як і під час знаходження функції для кінетики температури. Тобто спочатку необхідно знайти аналітичну функцію для кінетики вологовмісту ККПТ за різної температури термостата, далі – за різної відстані від його внутрішньої стінки, а після цього встановити зв'язок між даними функціями.

Необхідно відмітити, що для кінетики вологовмісту ККПТ додається ще один аргумент – початковий вологовміст.

Кінетики вологовмісту виділених малих (у порівнянні із внутрішнім об'ємом термостата) об'ємів ККПТ за різної температури термостата апроксимувались функцією виду:

$$w_T(\tau) = w_0 \cdot \exp(-b_T \cdot \tau^2), \quad (3.30)$$

де  $w_0$  – початковий вологовміст, кг/кг;

$b_T$  – апроксимаційний коефіцієнт,  $c^{-2}$ .

Оскільки під час досліджень використовувалась одна і та ж сировина, то початковий вологовміст для всіх зразків однаковий, і функції кінетики вологовмісту (3.30) за різної температури термостата відрізняються лише

значеннями апроксимаційного коефіцієнту  $b_T$ . Для даних апроксимаційних коефіцієнтів було отримано апроксимаційну функцію, яка наведена на рис. 3.26 та має вид:

$$b_T(T_m) = b_{0T} \cdot \exp(b_{1T} \cdot T_m), \quad (3.31)$$

де  $b_{0T} = 2,447 \cdot 10^{-5} \text{ (с}^{-2}\text{)}$ ,  $b_{1T} = 0,032 \text{ (}^\circ\text{C)}$  – апроксимаційні коефіцієнти.

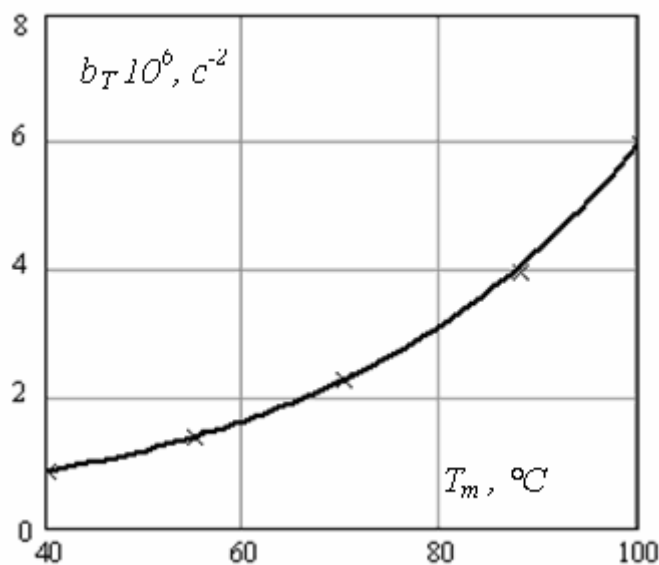


Рисунок 3.26 – Коефіцієнти  $b_T$  від температури термостата

Залежність коефіцієнтів  $b_T$  від температури термостата в діапазоні температур від 40 до 100 °C – експоненціальна, що свідчить про нелінійну залежність тривалості ІнТМО від температури термостата.

Оскільки коефіцієнти (3.31) є функціями температури термостата, то функція (3.30) є функцією часу та температури термостата.

Під час визначення аналітичного виду функції, що описує кінетику вологовмісту в залежності від відстані від стінки термостата, виникають труднощі з визначенням вологовмісту у визначених об'ємах всередині термостата. Тому для даних досліджень була використана наступна методика. Як було вказано вище, роботами з дослідження ІнТМО показано

[69, 70, 138-144], що температура матеріалу в цьому ефекті має кілька характерних ділянок, що істотно відрізняє даний спосіб ТМО від інших теплових способів. Типовість таких термограм дає можливість проведення якісного аналізу, тобто може бути використана для реєстрації та опису характеру ІнТМО.

Для визначення аналітичного виду функції, яка описує кінетику вологовмісту виділених малих об'ємів ККПТ в залежності від відстані до внутрішньої стінки термостата, вважається правомірним наступне припущення. Тривалість досягнення відповідним об'ємом ККПТ кінцевого вологовмісту визначається за кінетикою температури відповідного об'єму. Як було відмічено раніше, тривалість, за якої температура сировини досягає значення локального мінімуму, відповідає закінченню рідкої води в об'ємі де знаходиться термопара. Таким чином, тривалість процесу, за якої у даному об'ємі досягається локальний мінімум температури, вважається тривалістю зневоднення даного об'єму ККПТ.

Під час розрахунків зроблено наступне припущення. Необхідно відмітити, що оскільки обтюратори, через які організовується масообмін між внутрішнім середовищем термостата та навколишнім середовищем, знаходяться лише на гранях з характерними розмірами  $l_1 \times l_2$ , тобто в площині  $Oy \times Oz$ , то зміну вологовмісту ККПТ за координатами розраховували лише вздовж осі  $Ox$ . Таким чином, далі досліджується вологовміст шарів сировини всередині термостата елементарна товщина яких змінюється вздовж даної осі  $Ox$  (рис. 3.24).

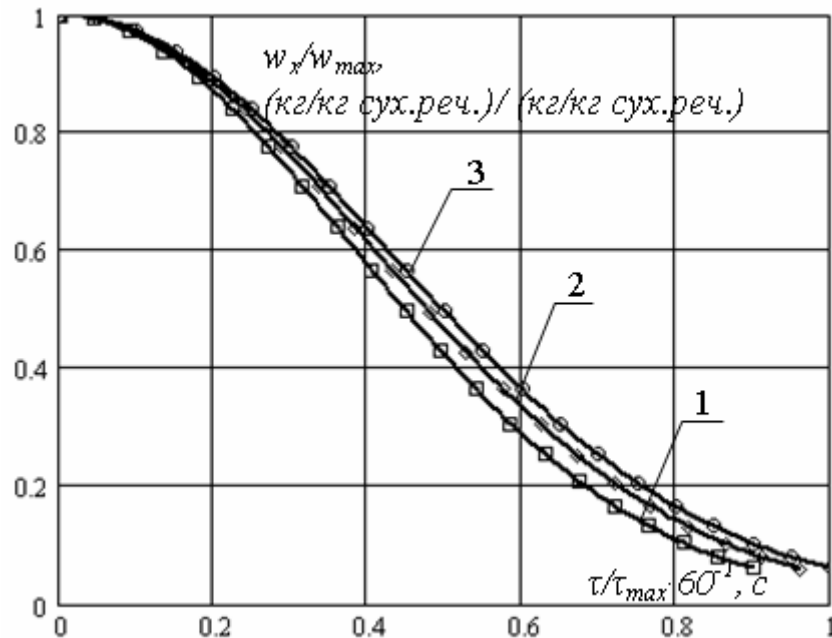
За кінетиками температури (рис. 3.25) шарів ККПТ всередині термостата встановлено, що тривалість досягнення кінцевого вологовмісту шару, який знаходиться безпосередньо біля внутрішньої стінки термостата, тобто на відстані 0 мм від неї, складає 0,9 відн.од. від загальної тривалості процесу; на відстані 5 мм – 0,96 відн.од.; посередині характерного розміру  $l_3$  ( $l_3=20$  мм), тобто на відстані 10 мм від внутрішньої стінки термостата – дорівнює тривалості процесу.



Далі, виходячи із тривалості зневоднення відповідного шару, за функцією

$$w_x(\tau) = w_0 \cdot \exp(-b_x \cdot \tau^2) \quad (3.32)$$

будується кінетика вологовмісту в залежності від відстані від стінки термостата, представлена на рис. 3.27, де  $b_x$  – апроксимаційний коефіцієнт ( $c^{-2}$ ). Кінетика вологовмісту пронормована на максимальний вологовміст.



**Рисунок 3.27 – Кінетика вологовмісту (пронормована на максимальну тривалість процесу  $\tau_{max}$  та на максимальний вологовміст  $w_{max}$ ) шарів ККПТ за різної відстані від внутрішньої стінки термостата, мм: 1 – 0; 2 – 5; 3 – 10**

Функції кінетики вологовмісту (3.32) за різної відстані від внутрішньої стінки термостата відрізняються лише значеннями апроксимаційного коефіцієнту  $b_x$ . Для обчислювання коефіцієнтів було отримано апроксимаційну функцію, яка представлена на рис. 3.28 та має вид:

$$b_x(x) = b0_x + b1_x \cdot \exp\left(-\frac{(x + b2_x)^2}{b3_x}\right). \quad (3.33)$$

де  $b0_x = -2,8$  ( $c^{-2}$ );  $b1_x = -0,67$  ( $c^{-2}$ );  $b2_x = -10 \cdot 10^{-3}$  (м);  $b3_x = 30 \cdot 10^{-6}$  ( $m^2$ ).

Залежність коефіцієнтів  $b_x$  від відстані від стінки термостата має нелінійний характер з наявним екстремумом. Отримане свідчить про наявність критичних значень товщини внутрішньої частини термостата (за умови використання термостата у формі паралелепіпеда) для реалізації ефекту ІнтМО, тобто про існування необхідних та достатніх вимог до розмірів термостата.

Таким чином, враховуючи залежність коефіцієнта (3.33) від координати  $x$ , тобто від відстані від внутрішньої стінки термостата вздовж осі  $Ox$ , функцію (3.32) слід вважати функцією координат та часу.

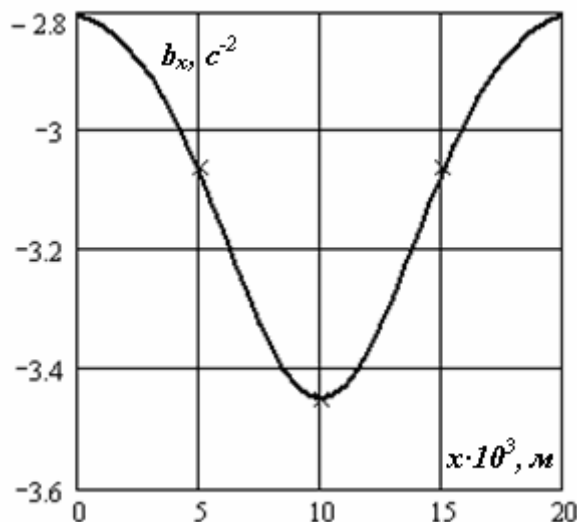


Рисунок 3.28 – Коефіцієнти  $b_x$  за різної відстані від внутрішньої стінки термостата

Функції (3.30) та (3.32) мають однаковий вид, але відрізняються вони набором аргументів: аргументами функції (3.30) є час та температура термостата, а функції (3.32) – час та відстань від стінки. Якщо навести відповідну кореляцію між коефіцієнтами (3.31) та (3.33), то для коефіцієнту

(3.33) можна отримати наступну залежність від координати та температури термостата:

$$b(x, T_m) = \frac{2.8}{3.45} \cdot b_T(T_m) + \left( -4.762 \cdot 10^{-7} + 0.19 \cdot b_T(T_m) \cdot \exp\left(-\frac{(x-10)^2}{30}\right) \right) \quad (3.34)$$

Далі підставимо отримані коефіцієнти в функцію (3.30) та отримаємо апроксимаційну функцію для кінетики вологовмісту ККПТ, аргументами якої є час, температура термостата та координата:

$$w(\tau, x, T_m) = w_0 \cdot \exp(-b(x, T_m) \cdot \tau^2). \quad (3.35)$$

Отримана функція використана для побудови фазових траєкторій стану системи під час ефекту ІнТМО та для знаходження аналітичного вигляду таких величин, як коефіцієнт теплопровідності, теплоємність і густина сировини, оскільки вони визначаються вологовмістом ККПТ і, як наслідок, є функціями часу, координат та рівноважної температури термостата.

### 3.3.7 Фазові траєкторії системи під час ефекту індукованого тепломасообміну за різних температур термостата та координати

Під час використання ІнТМО для зневоднення ККПТ важливим з точки зору удосконалення процесу ТМО та подальшого його використання на практиці є шлях 3 (рис. 3.3) еволюції системи між станами динамічної рівноваги та стійкої, а саме шлях, за яким відбувається «запуск», «протікання» та «закінчення» ефекту ІнТМО.

Для побудови фазових траєкторій (рис. 3.29) використовувались функції (3.29) та (3.35), при цьому значення температури були пронормовані

на температуру термостата. Нормування проводилось з метою зручності аналізу та наочності виявленого характеру фазових траєкторій за різних значень такого керуючого параметру, як температура термостата.

Як було відмічено під час аналізу загального вигляду фазових траєкторій для ТМО у термостаті (рис. 3.3), про «запуск» ефекту ІнТМО свідчить наявність ділянки, для якої  $dT < 0$ . Для таких значень прирощення температури фазова траєкторія знаходиться в області негативних значень функції  $\Psi(T, w_{вин})$  (на рис. 3.29 нижче пунктирної лінії).

Фазові траєкторії ефекту ІнТМО за різної температури термостата мають типовий характер: наявні ділянки фазової траєкторії з негативним знаком, відокремлені горизонтальною пунктирною лінією на рис. 3.29. З рисунку видно, що по мірі збільшення температури термостата, площа під негативною ділянкою збільшується.

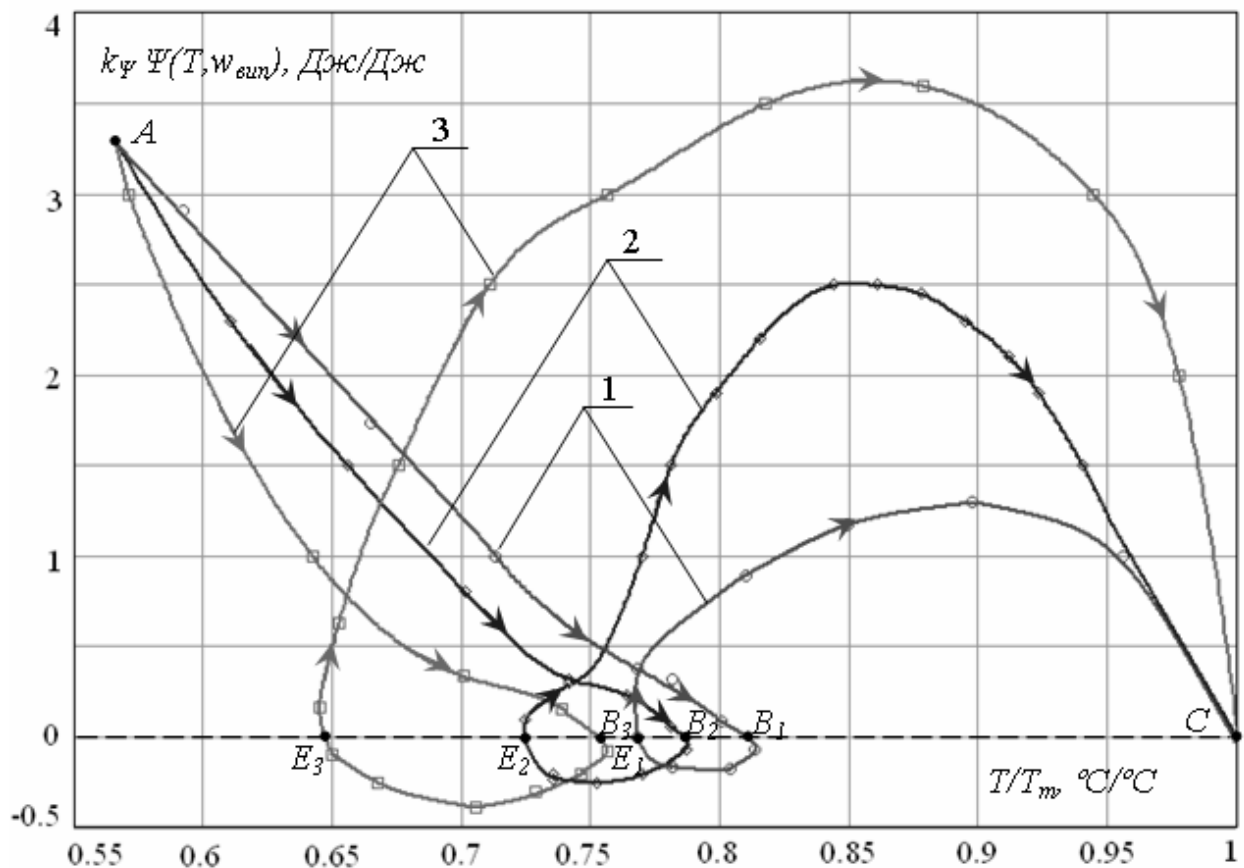
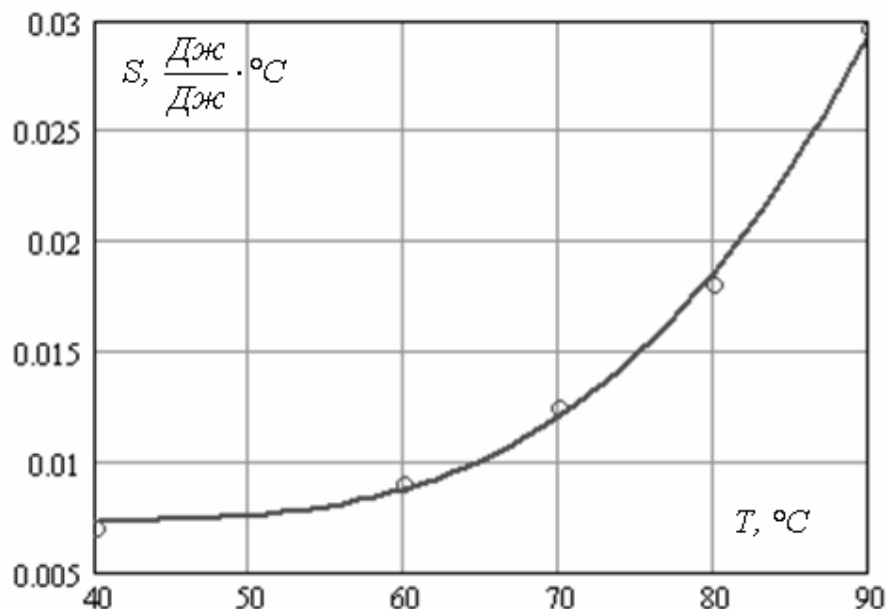


Рисунок 3.29 – Фазові траєкторії еволюції системи під час ефекту ІнТМО за різної температури термостата, °C: 1 – 40; 2 – 70; 3 – 90

Площі під ділянками фазових траєкторій (ділянки між точками  $B_i$  та  $E_i$ ) можна розрахувати, як визначений інтеграл від функції  $\Psi(T, w_{\text{вун}})$  у відповідних границях:

$$S_i = \int_{B_i}^{E_i} \Psi(T, w_{\text{вун}}) dT. \quad (3.36)$$

Залежність площі під негативною ділянкою фазової траєкторії ефекту ІнтМО від температури термостата (рис. 3.30) має нелінійний характер. Прирощення температури термостата на  $20^\circ\text{C}$  від значення  $40^\circ\text{C}$  до значення  $60^\circ\text{C}$  дає прирощення площі під негативною ділянкою фазової траєкторії – 20%, а те ж прирощення температури від значення  $80^\circ\text{C}$  до значення  $90^\circ\text{C}$  – 71%. Тобто збільшення температури термостата під час ефекту ІнтМО є ефективним.



**Рисунок 3.30 – Площа під негативною ділянкою фазової траєкторії ефекту ІнтМО від температури термостата**

Однак під час організації ефекту ІнТМО, особливо за температур термостата більших за температуру кипіння вільної рідини за даного тиску оточуючого середовища, умови підведення теплоти повинні бути узгоджені з умовами її розсіювання через фазовий перехід рідини I роду. Мається на увазі узгодженість між тривалістю досягнення рідиною температури кипіння (тривалість обумовлена теплопровідністю внутрішніх стінок термостата, теплопровідністю та теплоємністю рідини, тощо) та часом, необхідним для «запуску» ефекту ІнТМО (інерційність обумовлена тривалістю утворення суцільного газового середовища за парціальним тиском пари рідини у внутрішньому виділеному об'ємі термостата).

Обмеженням для температури термостата є вимоги до якості отримуваної продукції. Після закінчення ефекту ІнТМО через закінчення об'ємної води всередині термостата, його внутрішнє середовище опиняється в гігроскопічній області. Гігроскопічній області відповідає ділянка фазової траєкторії між точкою  $E$  та точкою стійкої рівноваги  $C$ . На даній ділянці фазової траєкторії має місце інтенсивне нагрівання внутрішнього середовища до температури термостата. Інтенсивне нагрівання може викликати необоротні зміни у механічних властивостях ККПТ, формах та структурі системної води, яку воно утримує. Таким чином, очевидне обмеження температури у відповідності до властивостей отримуваної продукції.

Використання максимально можливої для організації ефекту ІнТМО температури термостата є енергоефективним, але може чинити негативний вплив на якість продукції (за умови обробки термолабільної сировини).

Однак завдяки особливостям організації ефекту ІнТМО [226], існує можливість в залежності від етапу, на якому знаходиться динамічна система на шляху еволюції між станом нестійкої та станом стійкої рівноваги, обирати різну температуру термостата, а, відповідно, і різну температуру обробки сировини.

З використанням тих же функцій (3.29) та (3.35) побудовані фазові траєкторії еволюції системи за різної координати всередині термостата.

Фазові траєкторії на рис. 3.31 побудовані для паралелепіпедного ТМО-модуля наведеного на рис. 3.24., який обмежує внутрішнє середовище термостата. При цьому як і під час отримання функції для описання кінетики температури в залежності від координат, було зроблено припущення, що вздовж осей  $Oy$  та  $Oz$  перепад температур не суттєвий і фазові траєкторії для різних координат будувались лише вздовж осі  $Ox$ .

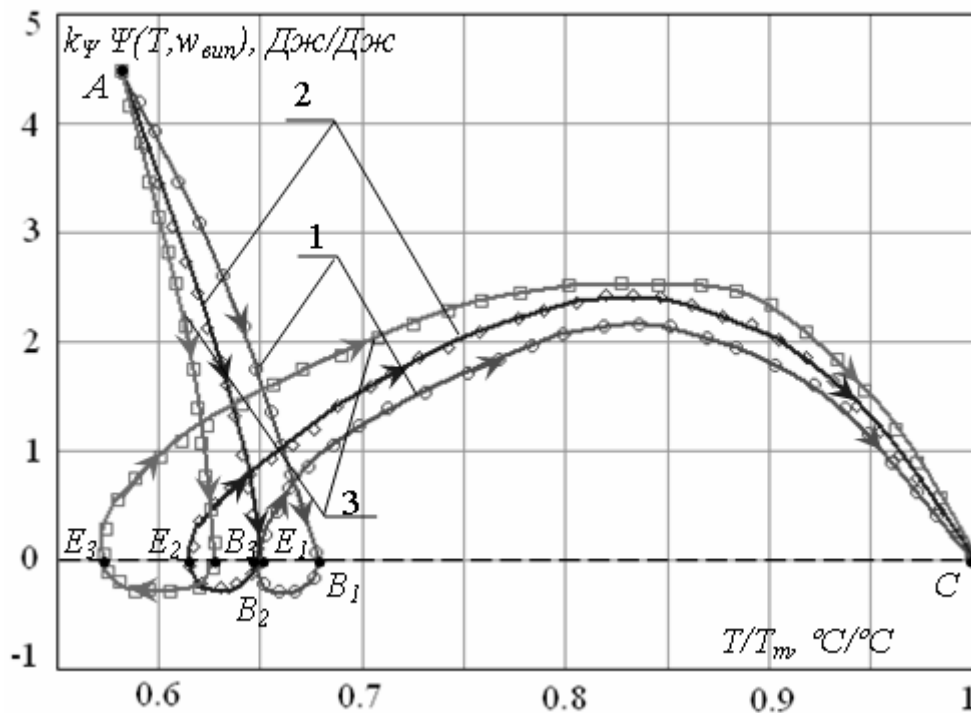


Рисунок 3.31 – Фазові траєкторії еволюції системи під час ефекту ІнТМО за різної координати всередині термостата у формі паралелепіпеду: 1 – 0; 2 –  $0,25 \cdot d_{max}$ ; 3 –  $0,5 \cdot d_{max}$

Попередніми дослідженнями ефекту ІнТМО та його окремого випадку процесу ЗТП-сушіння встановлено, що градієнт температури ККПТ по товщині ТМО-модуля (на рис. 3.24 вздовж осі  $Ox$ ) паралелепіпедної форми має однакове значення. Тому фазовий портрет для різних шарів ККПТ будувався, виходячи з того, що координатою були долі від товщини внутрішньої частини термостата. Тобто координата шару біля взаємно протилежних внутрішніх стінок термостата дорівнювала 0 та  $d_{max}$ , координата

середини товщини внутрішньої частини термостата –  $0,5 \cdot d_{max}$  і т.д. Отримання такого розподілення правомірне у діапазоні значень товщини внутрішньої частини термостата у формі паралелепіпеда від 10 до 40 мм. За більших значень товщини такі дослідження не проводились через відсутність необхідності використання ТМО-модуля паралелепіпедної форми, який обмежує внутрішній об'єм термостата, з більшими розмірами.

Необхідно відмітити, що фазові портрети для шарів ККПТ, які знаходяться на однаковій відстані від середини внутрішнього об'єму термостата у формі паралелепіпеда, але по різні сторони від неї, – однакові. Така симетрія спостерігається через те, що умови для ТМО взаємно протилежних стінок такого ТМО-модуля однакові.

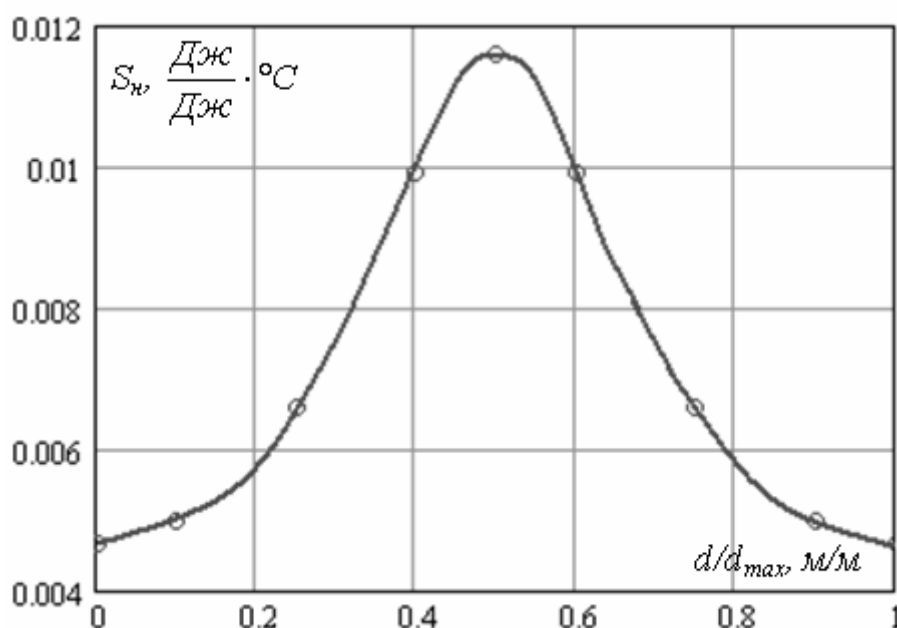


Рисунок 3.32 – Площа під негативною ділянкою фазової траєкторії ( $S_n$ ) ефекту ІнТМО за різної координати у внутрішній частині термостата

З виду фазових траєкторій за різної координати всередині внутрішньої частини термостата (рис. 3.31) слідує, що площа під негативною частиною фазової траєкторії по мірі наближення до середини її товщини збільшується, що свідчить про більшу енергоефективність ІнТМО в середньому шарі ККПТ. При цьому мінімум фазової траєкторії ефекту ІнТМО зміщується



вліво вздовж осі, на якій відкладено температуру. Тобто ІнТМО відбувається за меншої температури (у порівнянні з шарами біля внутрішньої стінки термостата різниця складає 10...15%), що є позитивним чинником для обробки термолабільної сировини.

Зміна площі під негативною ділянкою фазової траєкторії ефекту ІнТМО за різної координати у внутрішній частині термостата (рис. 3.32) має нелінійний характер, причому дана залежність має екстремум.

З точки зору величини площі під негативною ділянкою, як критерію енергоефективності ІнТМО, енергоефективність максимальна для центрального шару ККПТ у внутрішній частині термостата.

Таким чином, енергоефективним є вибір найбільшої товщини ТМО-модуля у формі паралелепіпеду, що обмежує внутрішній виділений об'єм термостата із вище означеного діапазону, тобто – 40 мм. Однак обмеженням даного вибору є теплофізичні властивості середовища всередині термостата та продуктивність обтюратора.

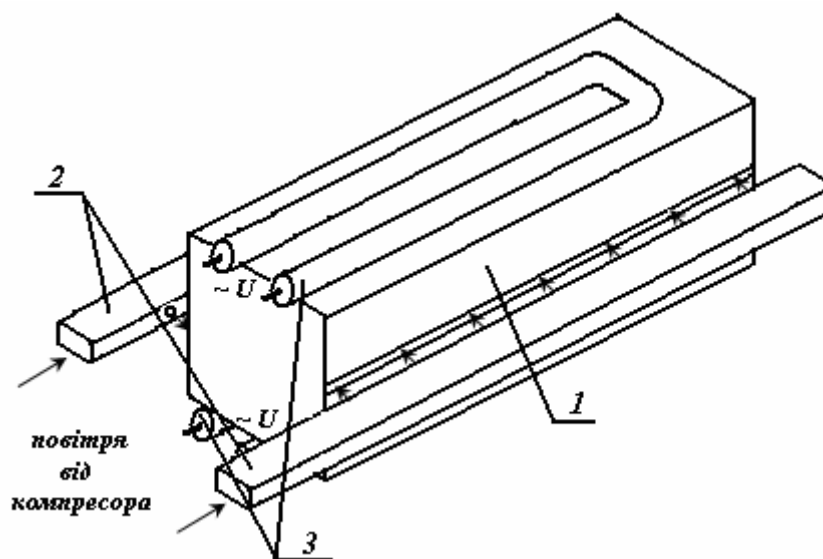
### 3.3.8 Вплив швидкості потоку повітря, що рухається відносно обтюратора термостата, на характер індукованого тепломасообміну

Для виявлення характеру ефекту ІнТМО за різної швидкості (гідродинамічного тиску) потоку повітря, що рухається відносно обтюраторів, використовувався термостат, внутрішні стінки якого мали форму паралелепіпеду (рис. 3.33) з розмірами 95×15×22 мм (ТМО-модуль, який обмежує виділений внутрішній об'єм термостата). Обтюратори виконані на площині 95×15 мм ТМО-модуля. Ширина площини обтюратора, яка граничить з навколишнім середовищем – 1 мм, довжина – 95 мм.

Вздовж зазорів з обтюраторами закріплені трубки, в яких виконані поздовжні прорізи за розмірами не менше зазору з обтюратором. Вони щільно закріплюються на зовнішній поверхні ТМО-модуля таким чином, щоб прорізи співпадали з зазорами. По трубкам рухається повітря, яке нагнітається

компресором. Термостатування здійснюється кондуктивним способом від двох нагрівальних елементів через площини  $22 \times 95$  мм. Необхідно відмітити, що напруга на нагрівальних елементах (спіралях) та сила струму через них підтримувались постійними, таким чином можна вважати, що тепловий потік від нагрівальних поверхонь підтримується постійним. Це одна із принципових відмінностей забезпечення ІнТМО в даній роботі від попередніх досліджень. Під час дослідження окремого випадку ефекту ІнТМО – ЗТП-сушіння, термостатування забезпечувалось постійною температурою теплоносія [69, 136-144] (межові умови III роду).

Термостат щільно заповнюється модельним ККПТ із синтетичної повсті. В даному дослідженні вирізалися шматки у формі паралелепіпедів розміром  $95 \times 5 \times 22$  мм, які розташовувались уздовж зазорів у внутрішніх стінках термостата, паралельно нагрівальним поверхням. Функції обтюратора виконує частина ККПТ, що щільно прилягає до зазору.



**Рисунок 3.33** – Схема експериментальної установки для виявлення впливу швидкості повітря, що рухається відносно обтюратора, на характер ефекту ІнТМО: 1 – модуль, який обмежує внутрішній об'єм термостата; 2 – канали для потоку повітря; 3 – нагрівальні елементи

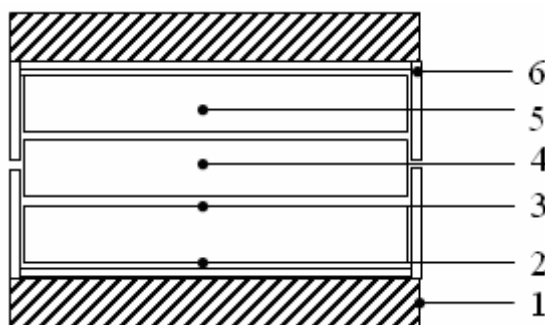
У шарах сировини розміщувалися термопари, як показано на рис. 3.34.

Гідродинамічний тиск визначали за допомогою трубки Піто, розміщеної в одному із каналів, по якому рухається повітря. Гідродинамічний тиск змінювався дискретно налаштуванням компресора та мав значення,  $Па$ : 100; 50; 10. Швидкість руху повітря визначали за формулою:

$$v = \sqrt{\frac{2p_{дин}}{\rho}}, \quad (3.37)$$

де  $p_{дин}$  – гідродинамічний тиск повітря,  $Па$ ;

$\rho$  – густина повітря,  $кг/м^3$ .

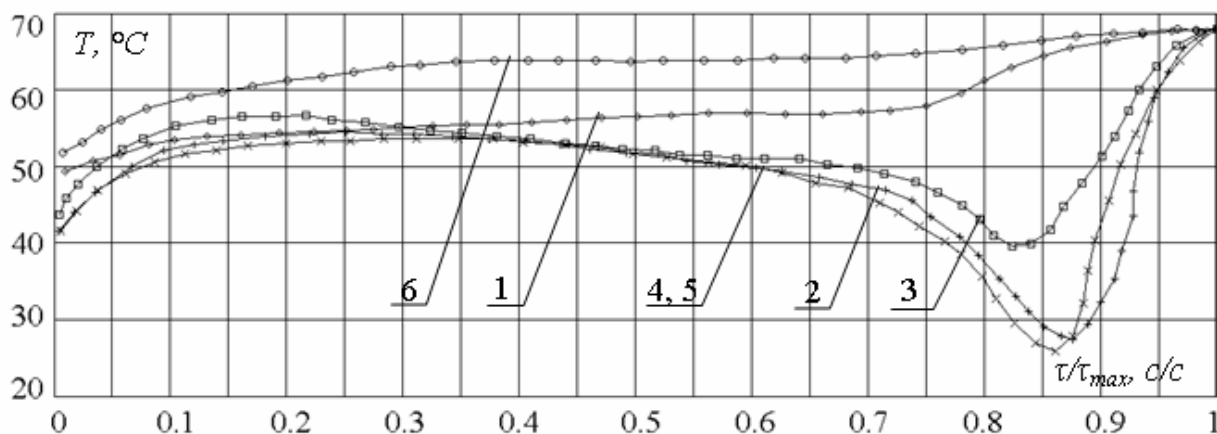


**Рисунок 3.34 – Схема розміщення термопар у внутрішній частині термостата для виявлення впливу величини швидкості (гідродинамічного тиску) потоку повітря, що рухається відносно обтюраторів на характер ефекту ІнтМО: 1, 2, 3, 4, 5, 6 – термопари**

При цьому швидкість руху повітря відповідно дорівнювала,  $м/с$  ( $Па$ ): 13 (100); 9 (50); 4 (10). Кінетика температури ККПТ під час ефекту ІнтМО, отримана для швидкості руху (гідродинамічного тиску) потоку повітря, що рухається відносно обтюраторів, 13  $м/с$  (100  $Па$ ), наведена на рис. 3.35.

Характер кінетик температури модельних ККПТ, отриманих від термопар, розташованих в різних точках всередині термостата – однаковий. Цифрами на рисунку позначені номери термопар з рис. 3.34. Температура ККПТ зростає, досягає певного значення (від 0,1 тривалості до 0,15 для різних координат), починаючи з якого спостерігається зменшення

температури. Починаючи з 0,38...0,4 тривалості процесу має місце зміна нахилу кінетики температури – зменшення температури стає більш значним. Починаючи з 0,7 тривалості процесу, спостерігається різке зменшення температури, яке закінчується мінімумом (0,83 (3), 0,85 (4, 5), 0,87 (2)). Далі температура збільшується і досягає значення температури термостата.



**Рисунок 3.35 – Кінетика температури ККПТ за швидкості (гідродинамічного тиску) потоку повітря, що рухається відносно обтюратора термостата 13 м/с (100 Па): 1, 2, 3, 4, 5, 6 – термопари з рис. 3.34**

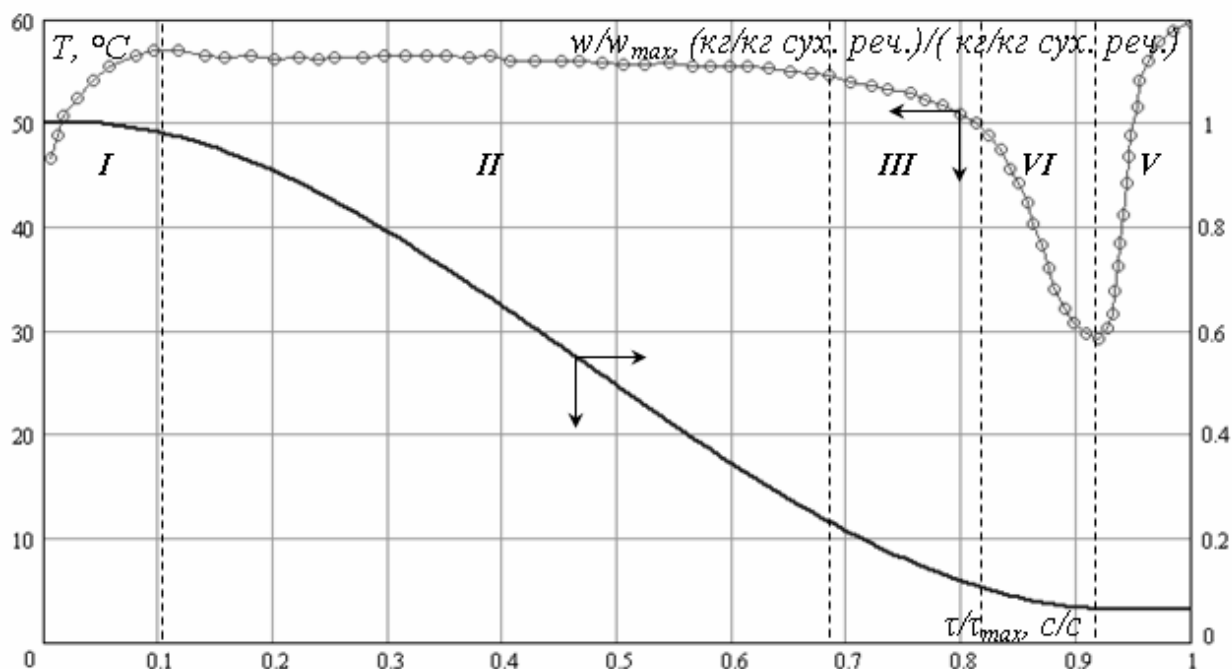
Виходячи з вигляду кінетик температури ККПТ під час ІнТМО, їх можна розділити на 5 характерних ділянок (рис. 3.36).

На першій ділянці має місце збільшення температури ККПТ до досягнення нею локального максимуму. Дана ділянка відповідає нагріванню матеріалу до визначеної температури та досягненню системою точки біфуркації.

На другій та третій ділянках температура монотонно зменшується. Відрізняються дані ділянки кутом нахилу до осі на якій відкладена тривалість процесу. На другій та третій ділянках збільшується інтенсивність розсіювання теплового потоку, який надходить від стінок термостата, на фазовий перехід води I роду.

На четвертій ділянці температура сировини різко зменшується та досягає локального мінімуму. Мінімум температури відповідає завершенню

ефекту ІнТМО через закінчення в термостаті системної води, яка бере участь у даному ефекті. ККПТ опиняється в області гіроскопічного вологовмісту, що доводить його кінетика вологовмісту (рис. 3.36).



**Рисунок 3.36 – Періодизація кінетики температури та вологовмісту модельного ККПТ під час ІнТМО у термостаті**

Збільшення кута нахилу під час переходу з другої ділянки на третю, з третьої на четверту пояснюється розвитком потужності розсіяння теплоти дисипативними структурами під час ІнТМО. Ефект завершується за максимальної потужності розсіяння теплоти дисипативними структурами через закінчення частини води, яка може випаруватися.

На п'ятій ділянці температура збільшується та досягає значення температури термостата. Дана ділянка відповідає нагріванню внутрішнього середовища термостата, а саме твердої, рідкої та газової фаз, до температури термостата.

Кінетики температури ККПТ за двох інших значень швидкості руху (гідродинамічного тиску) потоку повітря, що рухається відносно обтюраторів, тобто – 9 м/с (50 Па) та 4 м/с (10 Па), мають такий же характер.

Відмінності полягають у тривалості другої, третьої та четвертої ділянок, які відповідають «запуску», «протіканню» та «закінченню» ефекту ІнтМО. За збільшення швидкості обдування довжина ділянок змінюється наступним чином (табл. 3.6.).

Таблиця 3.6

## Відносна довжина ділянок кінетики температури під час ІнтМО

Швидкість, м/с:	Довжина ділянки $\Delta\tau / \tau_{max}$ , с/с		
	II	III	IV
4	0,58	0,12	0,08...0,125
9	0,5...0,55	0,2	0,12
13	0,23...0,3	0,3	0,17

Відносна довжина другої ділянки зменшується за збільшення швидкості обдування: при збільшенні швидкості в 2,25 разу – на 5...14%, при збільшенні в 3,35 разу – на 48...60%.

Відносна тривалість третьої ділянки збільшується за зміни швидкості обдування: при збільшенні швидкості в 2,25 разу – на 67%, при збільшенні в 3,35 разу – на 150%.

Відносна довжина четвертої ділянки за збільшення швидкості обдування в 2,25 разу змінюється не суттєво, у межах похибки, а за збільшення в 3,35 разу – на 62%.

Очевидно зміни у відносній довжині другої, третьої та четвертої ділянок пов'язані зі зміною інтенсивності розсіювання теплового потоку, який надходить до внутрішнього середовища термостата, на випаровування системної води ККПТ зі зміною швидкості руху (гідродинамічного тиску) потоку повітря, що рухається відносно обтюраторів.

Для виявлення причин такого впливу запишемо енергетичний баланс ефекту ІнтМО у термостаті за даних умов. Одними із вихідних даних для розрахунку балансу є кінетики температури стінки термостата (термопара 1 з рис. 3.34), які фіксувались впродовж експерименту. Кінетика температури

стінки термостата пропорційна тепловому потоку до внутрішнього середовища термостата з визначеним коефіцієнтом.

Кінетика теплового потоку системи «оточуюче середовище – термостат – внутрішнє середовище термостата» буде мати вигляд:

$$q_m = q_{втр} + q_{ex}, \quad (3.38)$$

де  $q_m$  – тепловий потік, що забезпечується нагрівальними поверхнями термостата, Дж/с;

$q_{втр}$  – постійний тепловий потік у оточуюче середовище (втрати теплового потоку), обумовлений тепловою конвекцією з зовнішньої поверхні стінок термостата, які контактують з навколишнім середовищем, Дж/с;

$q_{ex}$  – тепловий потік, який надходить до внутрішнього середовища термостата, Дж/с.

Для врахування втрат теплоти від зовнішньої поверхні стінок термостата у оточуюче середовище  $q_{втр}$  був проведений експеримент, у якому здійснювалось нагрівання термостата, заповненого матеріалом з відомою постійною теплоємністю, до рівноважної температури. При цьому умови проведення експерименту створювались такими ж, як і під час ІнТМО в термостаті з вологим ККПТ всередині.

За результатами експерименту отримано кінетику температури стінок в процесі нагрівання, а також кінетику теплового потоку, який надходить до внутрішнього середовища термостата, заповненого матеріалом з відомою постійною теплоємністю. Кінетика теплового потоку до внутрішнього середовища термостата розраховувалась, виходячи із кінетики температури матеріалу з відомою теплоємністю, який його заповнював. Дослідження проводились за температури оточуючого середовища 20...23 °С.

Отримані залежності відрізняються постійним масштабним коефіцієнтом  $coef_m$ . Даний коефіцієнт є ефективним коефіцієнтом

теплообміну між внутрішньою поверхнею стінок термостата та його внутрішнім виділеним об'ємом. Він залежить від площі зовнішньої поверхні стінок термостата, які контактують із оточуючим середовищем, та від температури стінок і температури оточуючого середовища. У розглянутому випадку для температури термостата 68...71 °С та температури оточуючого середовища 20...23 °С масштабний коефіцієнт дорівнює – 116  $\frac{Вт}{°С}$ . Таким чином, помноживши кінетику температури стінок термостата на даний масштабний коефіцієнт, можна визначити тепловий потік, який надходить до внутрішнього середовища термостата від поверхні його стінок:

$$q_{ex} = coef_M T_{н.п.}(\tau) \Big|_{t_{\infty}=const} \quad (3.39)$$

де  $T_{н.п.}(\tau)$  – функція, яка описує кінетику температури нагрівальної поверхні.

Тепловий потік, який надходить до внутрішнього середовища термостата, витрачається на фазовий перехід води ( $q_{вип}$ ) та нагрівання ККПТ ( $q_{с.р.}$ ) і системної води ( $q_{с.в.}$ ) до температури термостата:

$$q_{ex} = q_{вип} + q_{с.р.} + q_{с.в.} \quad (3.40)$$

при цьому частина теплового потоку, що витрачається на фазовий перехід системної води (потік, що розсіюється) розраховується за формулою:

$$q_{вип} = - \frac{dm_g}{d\tau} \cdot r; \quad (3.41)$$

частина теплового потоку, що витрачається на нагрівання ККПТ до поточної температури:



$$q_{c.p.} = C_{c.p.} m_{c.p.} \frac{dT}{d\tau}; \quad (3.42)$$

частина теплового потоку, що витрачається на нагрівання поточної маси системної води ( $m_{c.в.}$ ) всередині термостата до поточної температури:

$$q_{c.в.} = C_{c.в.} m_{c.в.} \frac{dT}{d\tau}; \quad (3.43)$$

де  $C_{c.p.}$ ,  $C_{c.в.}$  – теплоємність сухих речовин та системної води,  $\frac{Дж}{кг \cdot K}$ ;

$m_{c.p.}$  – маса сухих речовин, кг;

$m_{c.в.}$  – поточна маса системної води в термостаті, кг;

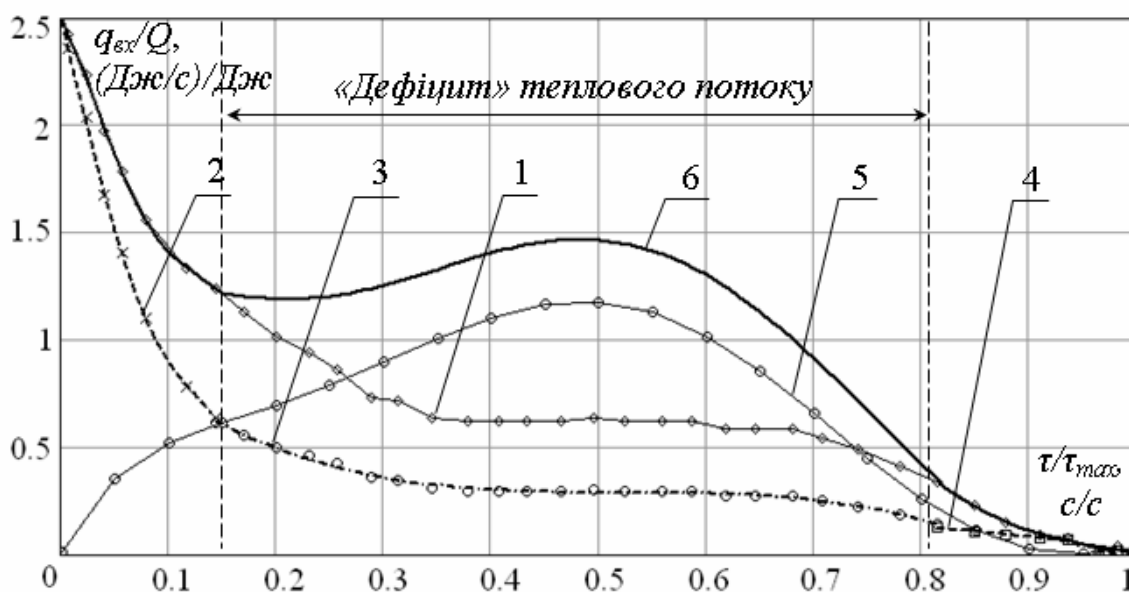
$r$  – питома теплота пароутворення,  $\frac{Дж}{кг}$ .

Побудуємо кінетику теплового потоку від стінок термостата до його внутрішнього середовища та кінетику теплового потоку, що витрачається у внутрішньому середовищі, як суму його складових, тобто як суму (3.41), (3.42) та (3.43). Вихідними даними при цьому будуть кінетика температури ККПТ, кінетика температури стінок термостата, кінетика вологовмісту ККПТ, теплоємність та маса сухих речовин, теплоємність води. Поточна маса води визначається за кінетикою вологовмісту ККПТ, яке заповнює весь об'єм термостата. Кінетика теплового потоку від стінок термостата визначається за формулою (3.39) як добуток функції, що описує кінетику температури його стінок, на масштабний коефіцієнт.

На рис. 3.37 використані наступні позначення. Цифрою 1 позначена кінетика теплового потоку від стінок термостата до його внутрішнього середовища, розрахована за формулою (3.39). Цифрами 2, 3 та 4 позначені кінетики теплового потоку, який витрачається на нагрівання сухих речовин та води до поточної температури, розраховані за ділянками відповідно до проведеної періодизації кінетики температури модельного ККПТ (рис. 3.36)

за формулами (3.42) та (3.43). Цифрою 5 позначена кінетика теплового потоку, який витрачається на випаровування води у внутрішньому середовищі термостата. Розрахунок даної кінетики проводився у відповідності до кінетики вологовмісту ККПТ за формулою (3.41). Кінетика теплового потоку, що витрачається у внутрішньому об'ємі термостата, розрахована за формулою (3.40), позначена цифрою 6.

Наведені кінетики теплового потоку для наочності пронормовані на загальну кількість теплоти, що надійшла до внутрішнього середовища термостата. Необхідно відзначити, що площа під кінетикою теплового потоку від стінок термостата пропорційна кількості теплоти, яка надходить до його внутрішнього середовища.



**Рисунок 3.37** – Кінетика теплового потоку від стінок термостата до його внутрішнього середовища (1) та кінетика теплового потоку, що витрачається внутрішнім середовищем термостата (6), отримана розрахунками за складовими (2-5), пронормовані на загальну кількість витраченої теплоти  $Q$

З отриманих результатів (рис. 3.37) видно, що теплота, яка надходить від стінок термостата до його внутрішнього середовища, має менше значення, ніж теплота, необхідна для нагрівання даного внутрішнього

середовища термостата до рівноважної температури його стінок та для фазового переходу рідини всередині термостата до газоподібного стану. Розрахунки свідчать про те, що під час ІнТМО наявний дефіцит теплоти, який складає 25...30% від необхідної кількості.

За першим початком термодинаміки, температура будь-якої системи за умови постійного теплового потоку ззовні може змінитися або шляхом передавання теплоти до тіла з меншою температурою, або шляхом виконання роботи:

$$dU = \delta Q \pm \delta A, \quad (3.44)$$

де  $dU$  – внутрішня енергія, Дж;

$\delta Q$  – кількість теплоти, переданої системі, Дж;

$\delta A$  – робота, яка виконується системою («-») або над системою («+»), Дж.

Встановлено, що теплового потоку від стінок термостата недостатньо для відтворення отриманої кінетики теплового потоку, який витрачається у внутрішньому середовищі термостата. Тому слід вважати, що факт, який спостерігається, свідчить про виконання роботи над системою, яка індукується потоком повітря, яке рухається відносно обтюратора термостата. При цьому, якщо повернутися до формули (1.10), то зовнішня робота потоку повітря, яке рухається відносно зовнішньої поверхні обтюратора термостата, забезпечує по величині енергію активації  $E_A$  ефекту ІнТМО. Роботами з дослідження ефекту ІнТМО, зокрема ЗТП-сушіння [69, 139, 140], показано, що за відсутності потоку повітря, що рухається відносно обтюраторів, або за швидкості потоку повітря (гідродинамічного тиску) менше визначеного мінімального значення, «запуск», «протікання» та «завершення» ефекту ІнТМО неможливі.

Таким чином, енергія активації  $E_A$  для організації ІнТМО забезпечується відповідною швидкістю (гідродинамічним тиском) потоку повітря, що рухається відносно обтюратора термостата.

З кінетики теплового потоку, що витрачається у внутрішньому середовищі термостата, за різної швидкості (гідродинамічного тиску) повітря (рис. 3.38), пронормованої на загальну кількість витраченої теплоти  $Q$ , видно, що характер залежностей однаковий. При цьому площа під кривими, пропорційна кількості енергії, яка витрачається в термостаті на ТМО. Площа під кривими розраховувалась без урахування нагрівання внутрішнього середовища термостата від початкової температури.

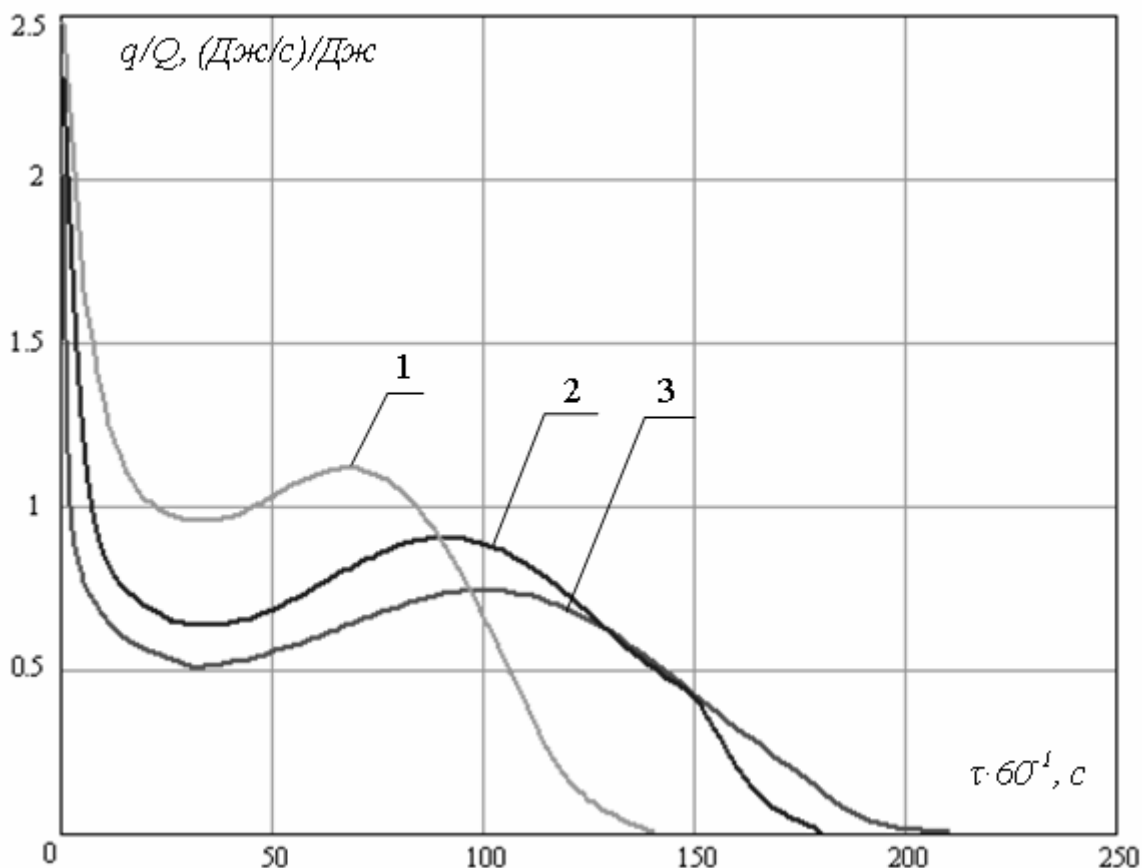


Рисунок 3.38 – Кінетика теплового потоку, що витрачається у внутрішньому середовищі термостата, за різної швидкості (гідродинамічного тиску) потоку повітря, що рухається відносно обтюраторів  $m/c$  (Па): 1 – 13 (100); 2 – 9 (50); 3 – 4 (10)

Відмінності наведених залежностей полягають в значеннях їх амплітуди та ширини локальних максимумів. Оскільки в кожному з трьох експериментів використовувався один і той же термостат, з тим же ККПТ, за однакової вихідної кількості системної води в термостаті, то площа під кривими повинна бути однаковою. Теплота, яка надходить від стінок термостата – однакова, тому інтенсивність процесу буде визначатись енергією потоку повітря, що рухається відносно обтюраторів. При цьому інтенсивність ІнТМО за різної швидкості потоку повітря, що рухається відносно обтюраторів, із діапазону від 4 до 13 м/с відрізняється в межах 15...20%. Встановлене свідчить про можливість регулювання інтенсивності ІнТМО швидкістю потоку повітря, яке рухається відносно обтюраторів.

Таким чином, розрахунком теплового потоку, який надходить до внутрішнього середовища термостата від його стінок, та теплового потоку, який розсіюється у даному внутрішньому середовищі, доведено, що ефект ІнТМО не можливий без зовнішньої роботи активації, яка виконується потоком повітря, що рухається відносно обтюраторів. При цьому робота потоку повітря, що рухається відносно обтюраторів, є тим керуючим параметром, за допомогою якого організовується «запуск» ІнТМО. Дана зовнішня робота забезпечує по величині енергію активації  $E_A$  ефекту ІнТМО. За значень даного керуючого параметру менших  $E_A$  «запуск» ефекту ІнТМО відсутній.

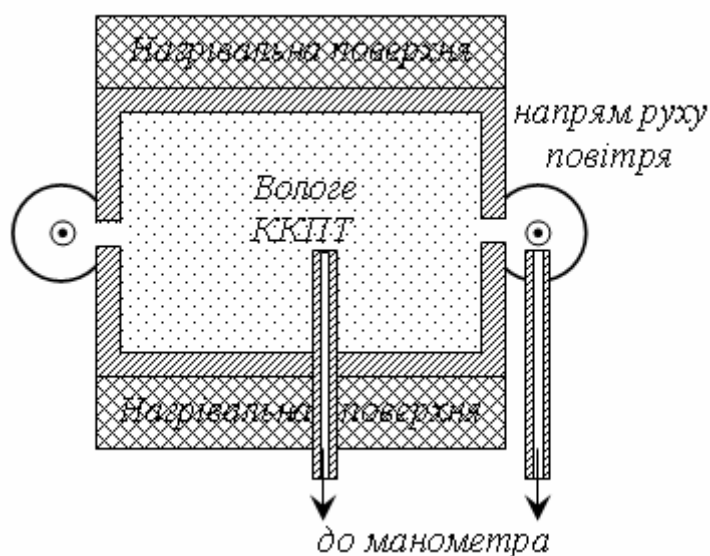
На одному з етапів дослідження кінетики ефекту ІнТМО за різної швидкості потоку повітря, що рухається відносно обтюраторів, було проведено серію експериментів з визначення співвідношення гідростатичного тиску в потоці повітря та гідростатичного тиску всередині термостата.

Для проведення такого дослідження було виготовлено диференціальний манометр, один кінець якого розміщали в різні точки внутрішнього середовища термостата, а інший всередину каналу (трубки), по якому рухається повітря, перпендикулярно до напрямку його руху (рис. 3.39).

Спочатку були проведені дослідження різниці гідростатичного тиску з сухим ККПТ у термостаті за відсутності рідкої фази у ньому. Далі організовували ефект ІнТМО у термостаті з вологим модельним ККПТ всередині, при цьому фіксували відхилення рідини в манометрі від положення рівноваги. Експеримент повторювали за різної швидкості потоку (гідродинамічного тиску) повітря, що рухається відносно обтюратора.

Експеримент проводився з точністю –  $\pm 4$  Па.

В результаті проведеного дослідження встановлено, що відхилення рідини в манометрі від положення рівноваги з сухим ККПТ та протягом ефекту ІнТМО з вологим ККПТ у термостаті у різних його точках, за різної швидкості (гідродинамічного тиску) потоку повітря, що рухається відносно обтюраторів, знаходиться у межах похибки.



**Рисунок 3.39 – Схема розміщення диференціального манометра в експериментальній установці**

Даний результат доводить відсутність процесу фільтрації вологи між обтюраторами через ККПТ або його несуттєвий вплив, оскільки рушійною силою процесу фільтрації є наявність постійного градієнту тиску, чого у ефекті ІнТМО експериментально не спостерігається.

Необхідно відмітити те, що енергія активації  $E_A$  ефекту ІнтМО за умови його «запуску», «протікання» та «завершення» забезпечується не стільки кінетичною енергією молекул ( $\frac{mv^2}{2}$ ) повітря, яке рухається відносно обтюраторів, скільки кінетичною енергією його потоку (його гідродинамічним тиском  $\frac{\rho v^2}{2}$ ), який не залежить від температури та масової секундної витрати повітря. Доводять дані ствердження наступні експерименти.

Організовували ефект ІнтМО в термостаті з вологим ККПТ. Експеримент проводився за умови руху відносно обтюраторів спочатку потоку повітря з лабораторною температурою (15...20 °С). Після цього дослідження повторювали за умови руху відносно обтюраторів потоку повітря з температурою, яка дорівнювала температурі термостата (60 °С). Термостатування виділеного внутрішнього об'єму термостата забезпечувалось нагрівальними поверхнями. При цьому реєстрували сигнали від термопар розміщених у термостаті. Отримані кінетики температур для термопари в центрі термостата всередині ККПТ наведені на рис. 3.40.

Представлений результат очевидно свідчить про те, що вплив підігріву потоку повітря на характер ефекту ІнтМО за даних умов організації експерименту не спостерігається. При цьому зміна тривалості процесу та величин локальних мінімумів та максимумів, характерних для ІнтМО, знаходяться в межах похибки. Отримане свідчить про відсутність значимого впливу підігріву повітря, а відповідно і зміни його ентальпії за рахунок підвищення температури, на ефект ІнтМО, та доводить, що основна функція повітря – створювати флуктуації концентрації частинок в об'ємі обтюратора. Тобто саме кінетична енергія потоку, що розсіюється, є такою, що індукує ефект ІнтМО.

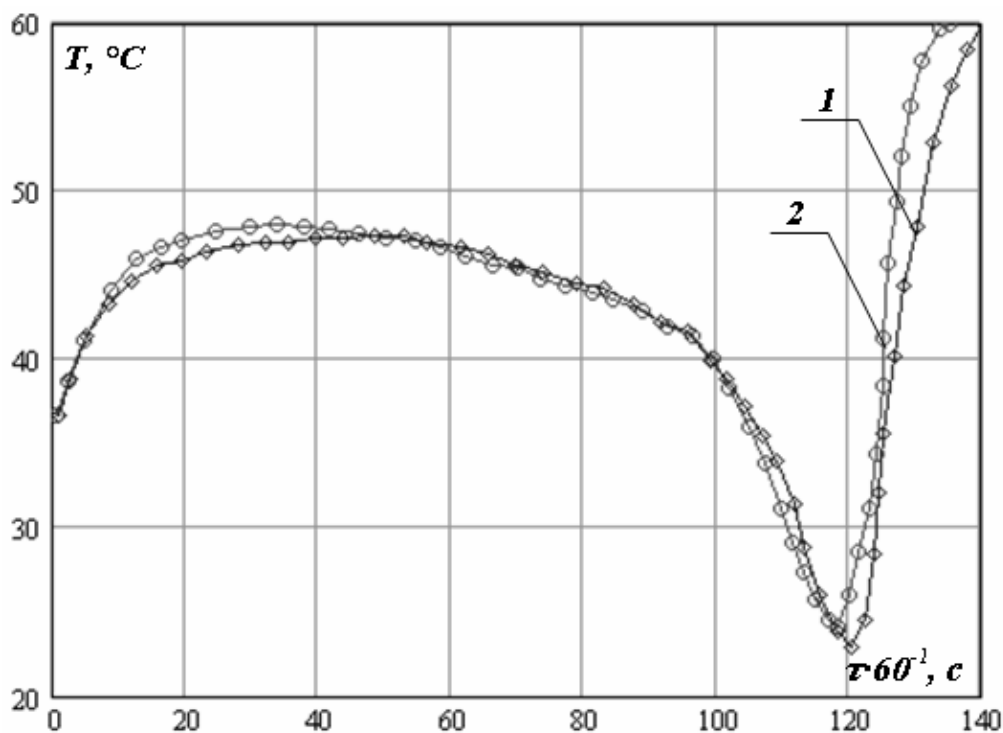


Рисунок 3.40 – Кінетики температури, отримані під час ефекту ІнТМО з обдуванням обтюраторів повітрям з температурою лабораторного приміщення (15...20 °С) (1) та повітрям, підігрітим до температури термостата (60 °С) (2)

Під час дослідження впливу витрат повітря на ефект ІнТМО, обтюратори спочатку обдували потоком повітря від компресора через трубки з прорізами, які щільно прилягають до зазорів на поверхні термостата, в яких розміщені обтюратори. При цьому за швидкості повітря  $4 \frac{M}{c}$  витрати повітря складала  $- 8 \cdot 10^{-4} \frac{M^3}{c}$ . Термостатування в даному експерименті забезпечувалось кондуктивним способом нагрівальними поверхнями.

Після цього експеримент проводили за умови розміщення ТМО-модуля, який обмежує внутрішній виділений об'єм термостата, з вологим ККПТ всередині до сушильної камери шафової сушарки (трубки для обдування зовнішньої поверхні обтюраторів повітрям від компресорів попередньо від'єднували). Термостатування у даному експерименті забезпечувалось конвективно повітрям тепломасообмінної камери



(сушильної камери шафової сушарки). При цьому напрям обдування зазорів з обтюраторами на поверхні термостата був таким же, його швидкість була тією ж  $4 \frac{м}{с}$ , а витрати дорівнювали  $8 \cdot 10^{-2} \frac{м^3}{с}$ .

І в першому, і в другому експерименті температура повітря, яким проводили обдування зазорів з обтюраторами, дорівнювала  $73...75 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Напряга та сила струму джерела живлення нагрівальних поверхонь підтримувались такими, щоб їх температура була однаковою в обох експериментах. За отриманими експериментальними даними побудовані фазові портрети ефекту ІнтМО наведені на рис. 3.41.

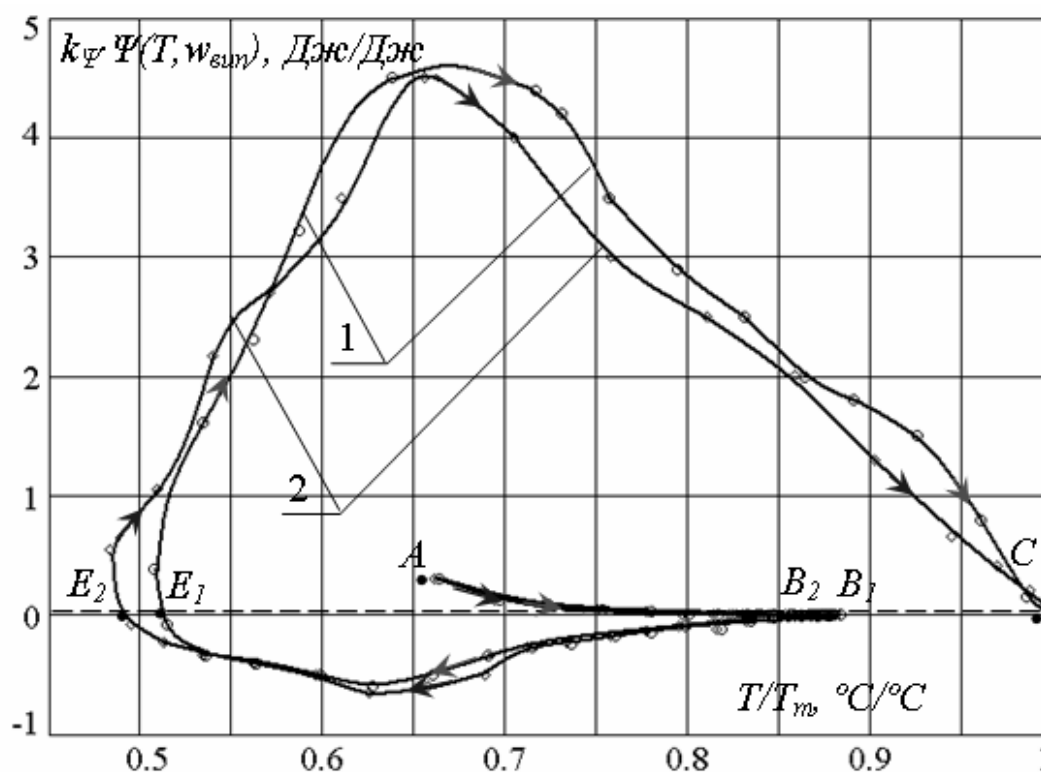


Рисунок 3.41 – Фазові портрети ефекту ІнтМО, отримані за обдування зовнішньої поверхні обтюраторів повітрям зі швидкістю  $4 \text{ м/с}$  з різними його витратами,  $\text{м}^3/\text{с}$ : 1 –  $8 \cdot 10^{-4}$ ; 2 –  $8 \cdot 10^{-2}$

Наведені фазові портрети за різних витрат повітря відрізняються один від одного у межах похибки, при тому, що витрати повітря відрізняються на два порядки. Величина витрат повітря не чинить видимого впливу на

характер ефекту ІнтМО. Слід вважати, як було відмічено раніше, потік повітря повинен не скільки поглинути вологу біля границі розділу, яка для ІнтМО знаходиться в об'ємі обтюраторів, скільки створити флуктуації параметрів газового середовища в них.

Таким чином, доведено, що енергія активації  $E_A$  ефекту ІнтМО досягається кінетичною енергією потоку повітря, що рухається відносно обтюраторів термостата. При цьому робота потоку повітря, що рухається відносно обтюраторів, є тим керуючим параметром, за допомогою якого організовується «запуск» ІнтМО, а температура і витрати повітря не чинять істотного впливу на характер ІнтМО і не є баластом енергії.

Встановлено, інтенсивність ІнтМО може регулюватися в межах 15...20% швидкістю потоку повітря (від 4 до 13 м/с), що рухається відносно обтюраторів. Встановлене доводить, що керування інтенсивністю ІнтМО, а, відповідно, і продуктивністю його апаратної реалізації, можливе не тільки температурою термостатування та тепловим потоком від стінок термостата до його внутрішнього середовища, але і гідродинамічними характеристиками потоку повітря, яке рухається відносно обтюраторів термостата, що свідчить про ефективність ІнтМО.

### 3.3.9 Вплив на характер ефекту індукованого тепломасообміну кута обдування обтюраторів потоком повітря

В попередньому підрозділі доведено, що основною функцією потоку повітря, що рухається відносно обтюраторів, є створення флуктуації параметрів газового середовища в об'ємі обтюратора. Доведено при цьому, що енергія активації  $E_A$  ефекту ІнтМО забезпечується кінетичною енергією потоку повітря, яка є визначальним чинником для запуску даного ефекту. При цьому, слід відмітити, дисипація кінетичної енергії потоку повітря залежить від кута обдування обтюратора. Виходячи з цього, кут обдування обтюратора є одним із керуючих параметрів динамічної системи

«навколишнє середовище – обтюратор – внутрішнє середовище термостата». Даний керуючий параметр є однією із вихідних вимог до конструкції апаратів з використанням ефекту ІнтМО.

Під час ІнтМО в типових ЗТП-сушарках, в яких функцію термостатування виконує потік повітря, що обдуває ТМО-модуль (функціональну ємність (ФЄ)), який обмежує внутрішнє середовище термостата, підведення теплоти до внутрішнього об'єму термостата здійснюється змішаним способом. При цьому, як правило, використовуються двосторонні ФЄ у формі паралелепіпеда. В таких ФЄ було виявлено, що в їх центральній площині (в області геометричної симетрії) знаходиться критична область, де відбувається відхилення умов для «запуску» та «протікання» ефекту ІнтМО. Це обумовлено тим, що в центральній частині ФЄ гідродинамічні умови для обтікання зовнішнім повітрям поверхні суттєво відрізняються від аналогічних з боку торців ємності, де динамічний тиск потоку максимальний, а статичний – мінімальний. Щоб вирівняти розподіл між статичним та динамічним тисками вздовж всієї поверхні ФЄ використовуються вставки-турбулізатори, які розміщуються вздовж площин ФЄ [69, 140, 227, 228].

Вважається, що швидкість потоку повітря поблизу газонепроникної стінки ФЄ прагне до нуля. При цьому динамічний тиск потоку мінімальний, а статичний – максимальний [69].

Розрив поверхні ФЄ (зазор, в якому знаходиться обтюратор) вносить істотне локальне збурювання в характер розподілу тисків. Такі збурювання мають стохастичний нестійкий характер [229-231]: утворюються завихрення потоку з нестійким часом життя.

Роботами з дослідження ЗТП-сушіння [69, 139-141] встановлено, що мінімальним значенням швидкості повітря, за якого можлива реалізація «запуску», «протікання» та «завершення» ефекту ІнтМО є швидкість більша за 3 м/с. Якщо розрахувати число Рейнольдса для такої швидкості та мінімальної температури, за якої можливий ефект ІнтМО (30...40 °С), то

його значення буде більшим за 2500 ( $Re > 2.5 \cdot 10^3$ ). Оскільки критичним значенням критерію Рейнольдса між ламінарним та турбулентним режимом плинину вважається  $Re_{кр} = 2000$ , то слід вважати, що реалізація ефекту ІНТМО можлива лише за турбулентного режиму плинину повітря [232-234]. При цьому, з метою підвищення ефективності процесу, важливим є забезпечення по можливості рівномірного розподілення турбулентних збурювань вздовж обтюраторів.

Турбулентність, як відомо із класичного визначення [233] – це трьохмірний нестационарний рух, в якому внаслідок розтягання вихорів створюється неперервний розподіл пульсацій швидкості в інтервалі довжин хвиль від мінімальних, що визначаються в'язкими силами, до максимальних, що визначаються граничними умовами плинину.

Внаслідок існування нелінійної залежності між швидкістю руху речовини та потоком кількості руху, що міститься в системі рівнянь для опису турбулентних збурювань, а також через наявність в даних рівняннях напружень Рейнольдса, не існує можливості теоретичного вирішення повної системи рівнянь Нав'є–Стокса для такого нестационарного плинину. Таким чином, для якісного уявлення про турбулентні збурювання та отримання кількісної інформації, необхідної для технічних розрахунків, використовуються експериментальні дослідження [235-237].

В дослідженні [238-240] використовувалась експериментальна установка загальний вигляд якої представлений на рис. 3.19.

Особливістю установки (рис. 3.33), що застосовувалась у експерименті, є трубки, через які повітрям від компресора обдуваються зазори з обтюраторами. По довжині трубок зроблені отвори малого діаметру (1 мм). Трубки розміщують таким чином, щоб отвори знаходились навпроти обтюраторів. Існує можливість змінювати кут обдування зазорів з обтюраторами потоком повітря, шляхом їх повертання в тримачах. Під кутом обдування мається на увазі кут між нормаллю до поверхні зазору та напрямом руху потоку повітря. Внутрішня частина термостата при цьому

заповнювалась вологим модельним ККПТ. У вологому ККПТ розміщали термопар.

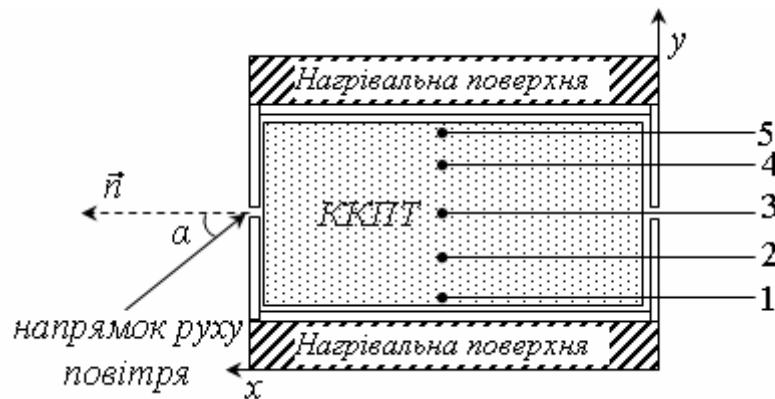


Рисунок 3.42 – Схема розміщення термопар у ККПТ всередині термостата під час дослідження впливу на характер ефекту ІнТМО кута обдування повітрям обтюраторів

Дослідження проводились для швидкості руху потоку повітря  $10 \text{ м/с}$ . Кут обдування зазорів з обтюраторами ( $\alpha$ ) змінювався від  $0^\circ$  до  $90^\circ$ . Під кутом обдування мається на увазі кут між віссю  $Ox$  та напрямком руху потоку повітря, як це показано на рис. 3.42.

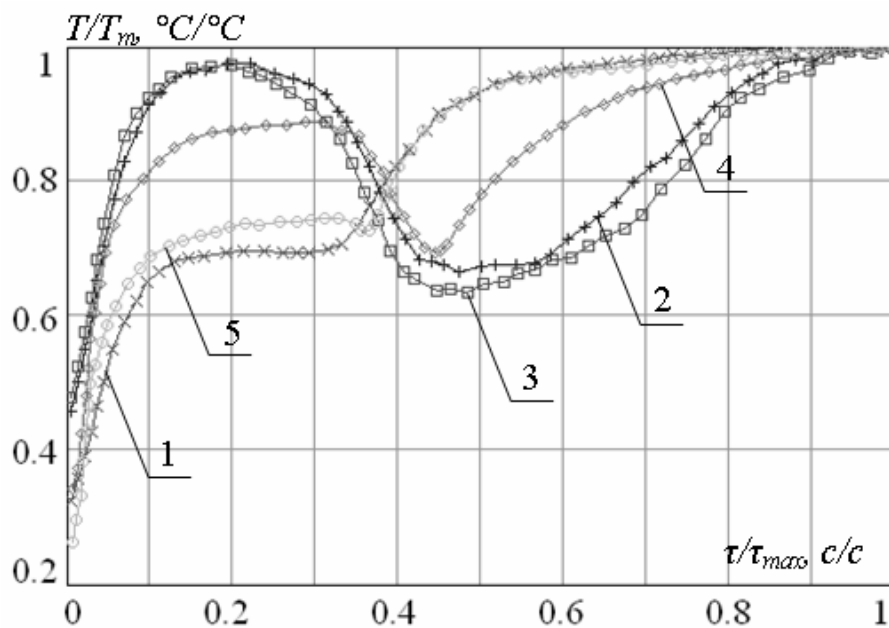
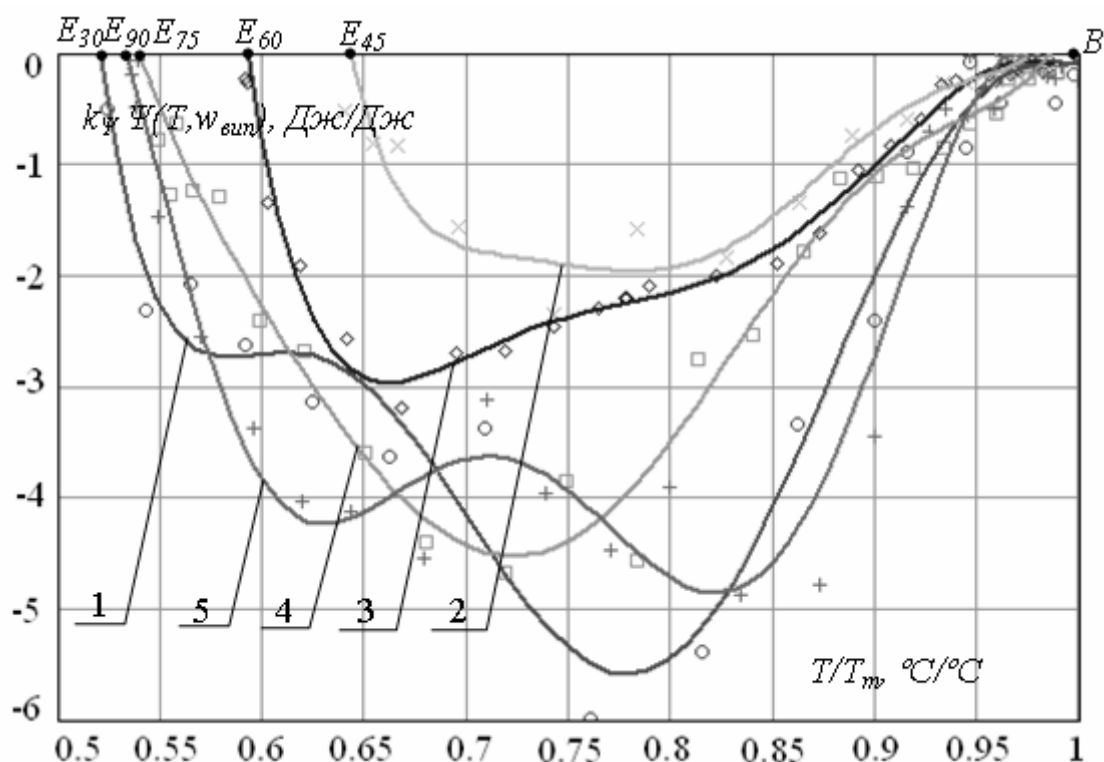


Рисунок 3.43 – Кінезики температури ККПТ, отримані під час ІнТМО за кута обдування повітрям обтюраторів  $\alpha=0^\circ$  (1, 2, 3, 4, 5 – термопары з рис. 3.42)

Кінетики температур ККПТ за різних кутів обдування повітрям обтюраторів мають типовий для ефекту ІнтМО характер. На рис. 3.43 наведено кінетику температури для кута обдування  $\alpha=0^\circ$ .

Характер фазових траєкторій також однаковий, але відрізняються вони частинами фазової траєкторії у негативній частині фазового простору. З рис. 3.44 видно, що площа яку обмежує негативна ділянка фазової траєкторії різна за різних кутів обдування обтюраторів.

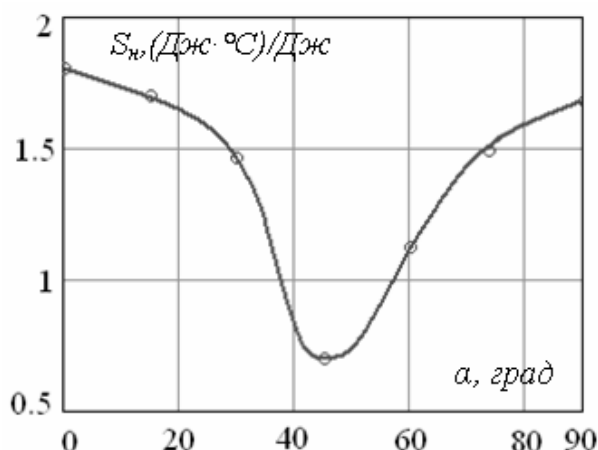


**Рисунок 3.44 – Негативні ділянки фазових траєкторій для еволюції системи під час ІнтМО за різних кутів обдування обтюраторів потоком повітря, град: 1 – 30; 2 – 45; 3 – 60; 4 – 75; 5 – 90**

Розрахунок площ під негативними ділянками фазових траєкторій показує, що вони нелінійно залежать від кута обдування обтюраторів потоком повітря (рис. 3.45).

Як слідує із наведеного рисунка, залежність площі під негативною ділянкою фазової траєкторії від кута обдування обтюраторів має локальний мінімум. Як відмічено вище, розраховані площі є критеріями

енергоефективності ІнТМО за даних умов організації ТМО, оскільки вони пропорційні частині тепловмісту внутрішнього середовища термостата, витраченому на фазовий перехід рідини даного середовища у газовий стан. Таким чином, чим більша площа під негативною частиною фазової траєкторії, тим вища енергоефективність ІнТМО.



**Рисунок 3.45 – Площа під негативною ділянкою фазової траєкторії ефекту ІнТМО від кута обдування обтюраторів потоком повітря**

Отриманий результат свідчать про те, що для кутів обдування обтюраторів із діапазону від  $35^\circ$  до  $55^\circ$  енергетична ефективність ІнТМО найменша у порівнянні з іншими кутами обдування. При цьому тривалість процесу досягнення ККПТ гігроскопічного стану найдовша на 33...45%. При збільшенні та при зменшенні кута обдування відносно даного діапазону відбувається збільшення площі під негативною ділянкою фазової траєкторії та, відповідно, зменшення тривалості процесу ТМО за однакових інших умов організації ІнТМО.

Найменша тривалість досягнення ККПТ гігроскопічного стану під час ІнТМО спостерігається для випадків, коли потік повітря направлений до зазорів з обтюраторами під кутами із діапазонів від  $0^\circ$  до  $30^\circ$  та від  $70^\circ$  до  $90^\circ$ . За тих же діапазонів кутів локальний максимум кінетики температури досягається раніше, тобто для таких кутів обдування раніше «запускається» ефект ІнТМО.

Причиною такої залежності є те, що серед досліджуваних кутів обдування обтюраторів повітрям, кути обдування  $0^\circ$  та  $90^\circ$  є такими, за яких створюються найбільш сприятливі умови для виникнення турбулентних збурень [233, 241, 242].

Умови для утворення турбулентних збурень під час руху потоку повітря під кутом обдування зазорів з обтюраторами  $0^\circ$  аналогічній умовам, створюваним під час руху газу у каналі прямокутного перерізу, коли взаємодіючі поля дотичних напружень спрямовані відносно один одного під кутом  $90^\circ$  [233-235]. Випадок руху потоку повітря під кутом обдування зазору  $90^\circ$  аналогічний випадку обтікання плоскої поверхні з геометричними неоднорідностями, коли нормальні напруження сумірні з дотичними [227, 228]. Відповідно, умови для утворення турбулентного руху потоку повітря під час обдування обтюраторів під іншими досліджуваними кутами займають проміжне положення, в результаті чого розподілення турбулентних збурень має меншу рівномірність.

Таким чином, встановлено, що «запуск», «протікання» та «завершення» ефекту ІнтМО можливе за будь-яких кутів обдування обтюраторів, але необхідно забезпечувати наявність необхідної для реалізації ефекту швидкості потоку біля всіх обтюраторів.

Як відмічено вище, в типових ЗТП-сушарках для уникнення утворення в центральній частині двосторонньої ФЄ критичної області, пов'язаної з відривом потоку від поверхні ФЄ, використовують вставки-турбулізатори [69], які розміщуються між площиною ФЄ та стінкою сушильної камери. Виходячи із цього та із результатів проведеного дослідження, для успішної реалізації ефекту ІнтМО керувати його «запуском», «протіканням» та «завершенням» можливо шляхом індивідуального обдування обтюраторів.

Раціональними із досліджуваних з точки зору енергоефективності ІнтМО слід вважати кути обдування обтюраторів потоком повітря  $0^\circ$  та  $90^\circ$ . Обмеженням використання для обдування зазору потоком повітря під кутом  $0^\circ$  є наступне. Під час направлення потоку повітря перпендикулярно до



поверхні обтюатора, створюється додатковий тиск на його поверхню, яка контактує з оточуючим середовищем. В результаті такої дії, оскільки зазори часто виконуються з протилежних сторін ТМО-модуля, який обмежує внутрішній виділений об'єм термостата, через неоднорідність потоку можливе виникнення постійного градієнту тиску. Внаслідок цього можливе виникнення потоку повітря через внутрішню частину термостата. Виникнення такого потоку порушує суцільність середовища за парціальним тиском пари рідини, внаслідок чого можливий «зрив» ефекту ІнтМО.

Таким чином, дослідженнями кінетики температури, кінетики вологовмісту ККПТ всередині термостата та аналізу фазового портрету ефекту ІнтМО за різних кутів обдування повітрям обтюаторів із діапазону від  $0^\circ$  до  $90^\circ$ , встановлено, що досліджувані кінетики температури та вологовмісту ККПТ за досліджуваних кутів обдування мають типовий для ефекту ІнтМО характер.

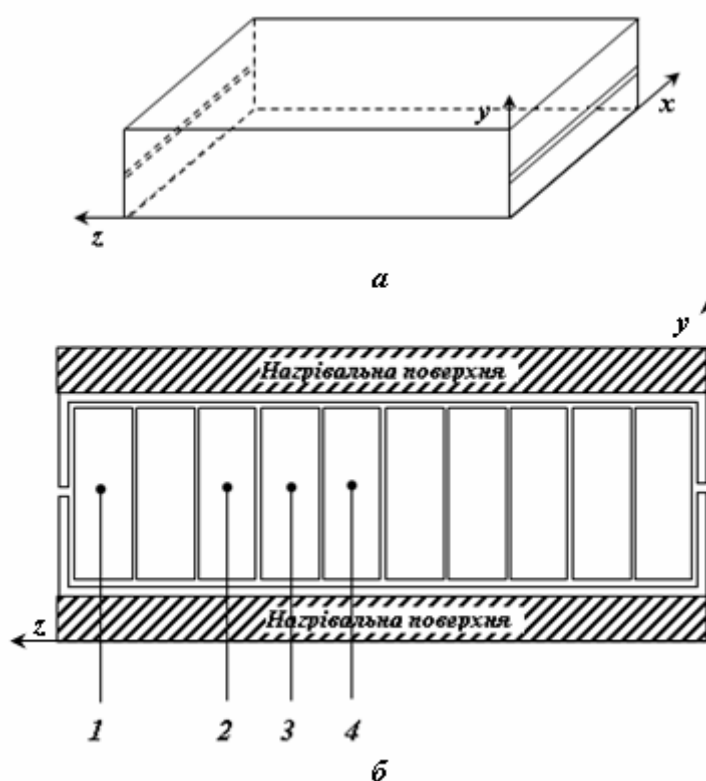
Встановлено, що енергоефективність ІнтМО найменша для кутів обдування із діапазону від  $35^\circ$  до  $55^\circ$ . Встановлено, при збільшенні та при зменшенні кута обдування відносно даного діапазону відбувається зменшення тривалості ІнтМО, а енергоефективність його збільшується.

### 3.3.10 Вплив на характер ефекту індукованого тепломасообміну розмірів внутрішнього виділеного об'єму термостата

У підрозд. 3.3.7 визначене раціональне значення товщини ТМО-модуля, що обмежує внутрішній виділений об'єм термостата, в даному підрозділі проведено дослідження характеру ефекту ІнтМО у модулі, один із габаритних розмірів якого збільшений більше, ніж в два рази (рис. 3.46). Даний ТМО-модуль має форму паралелепіпеду з габаритними розмірами –  $95 \times 15 \times 50$  мм. Обтюатори виконані на площині  $95 \times 15$  мм, ширина зовнішньої поверхні обтюатора – 1 мм, довжина – 95 мм. Підведення теплоти до модуля здійснюється кондуктивно від двох нагрівальних

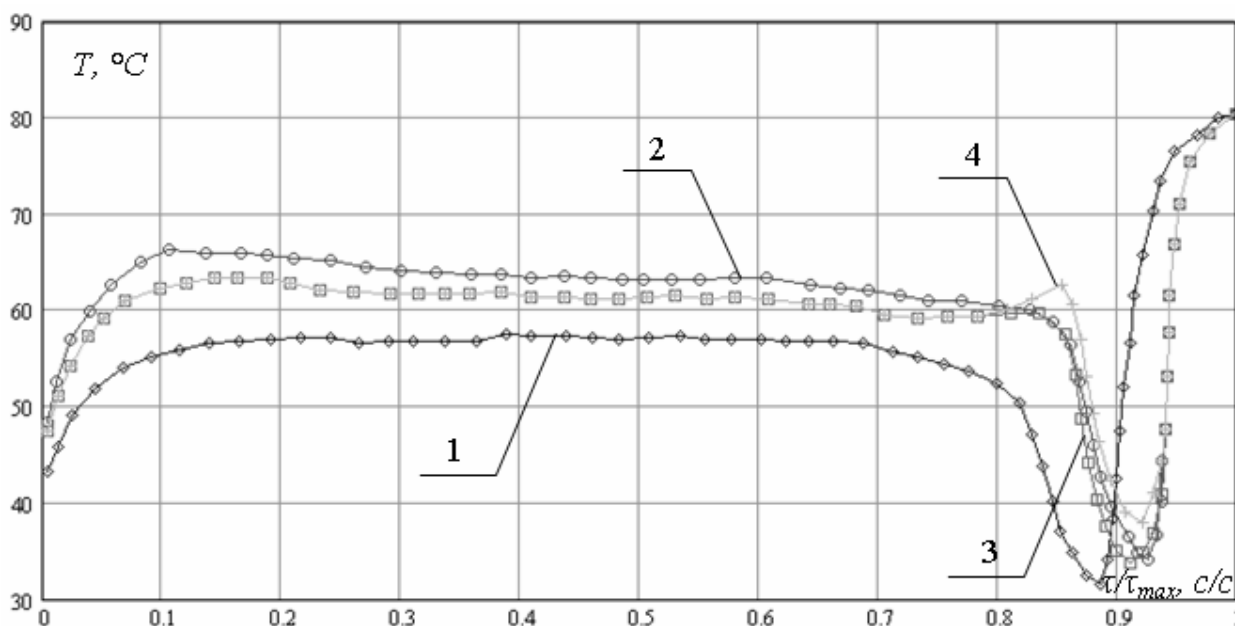
поверхонь через площини  $50 \times 95$  мм. Таким чином, збільшено у 2,3 разу один із габаритних розмірів, відповідно в 2,3 разу збільшився об'єм внутрішнього середовища термостата. Термостат щільно заповнювався шарами волого ККПТ у формі паралелепіпедів. Термопари у внутрішньому середовищі розміщувались як показано на рис. 3.46.

Обдування обтюраторів потоком повітря здійснювалось, як і в попередніх експериментах через канали з прорізами, які щільно закріплюються до зовнішньої поверхні стінки термостата вздовж обтюраторів. Отримані кінетики температури наведені на рис. 3.47.



**Рисунок 3.46 – Схема (а) ТМО-модуля, що обмежує внутрішній виділений об'єм термостата, з габаритними розмірами  $95 \times 15 \times 50$  мм та схема розміщення термопар в ньому (б)**

Наведені кінетики доводять, що в даному термостаті ефект ІнТМО реалізовується, тобто за особливими точками видно: наявні «запуск», «протікання» та «завершення» ефекту ІнТМО.



**Рисунок 3.47 – Кінетики температури (пронормовані на максимальну тривалість процесу  $\tau_{max}$ ) ККПТ під час ефекту ІнтМО у термостаті з габаритними розмірами його внутрішньої частини –  $95 \times 15 \times 50$  мм (1, 2, 3, 4 – термодатчики з рис. 3.46)**

В роботі [67], виявлено вплив розмірів двостороннього ТМО-модулю (ФЄ) для ЗТП-сушарок на кінетику процесу ЗТП-сушіння (реалізації ефекту ІнтМО для зневоднення волого ККПТ). Двосторонні ФЄ являють собою дві паралельні площини, на яких зроблені зазори та перфорація для обтюраторів. Роль обтюраторів виконує частина ККПТ яка прилягає до зазору або перфорації. Термостатування ФЄ здійснюється конвективним способом, шляхом обдування її нагрітим до температури термостата повітрям. Професором Погожих М.І. доведена складна залежність кінетики ЗТП-сушіння від розмірів двосторонніх ФЄ, пов'язана з механізмом проникнення сушильного агента всередину ФЄ. Під час зневоднення відбувається утворення пор безпосередньо під теплообмінною поверхнею, при чому, чим більша її площа, тим більший їх об'єм. Якщо в ці пори починає надходити повітря, по ходу свого руху воно насичується паром води і випаровування води з вологої зони матеріалу припиняється. Через це, волога зона перегрівається і відбувається механічне руйнування цілісності сировини та

утворення порожнеч. Утворення порожнеч сприяє збільшенню кількості повітря, що надходить всередину ФЄ з оточуючого середовища, що призводить до або трансформації ЗТП-процесу в конвективне, або блокування процесу зневоднення. Ґрунтуючись на наведеній вище моделі механізму масообміну під час ефекту ІнТМО, такий результат можна пояснити невиконанням обтюраторами своїх функцій та порушенням суцільності середовища всередині ФЄ за парціальним тиском пари рідини.

Таким чином, дослідження, результати якого наведені на рис. 3.47, доводить, що за умови збереження суцільності середовища за парціальним тиском пари рідини, габаритний розмір внутрішнього виділеного об'єму термостата не має обмежень з точки зору реалізації ефекту ІнТМО. В залежності від способу застосування ІнТМО на практиці, обмеження до розміру термостатів досліджуваної конструкції (рис. 3.46) слід ставити, виходячи із продуктивності обтюраторів, тобто з точки зору стоку маси через них.

Таким чином, дослідженнями проведеними в розділі підтверджено гіпотезу ефекту ІнТМО та виявлені можливості його використання для виконання низки теплових операцій харчової промисловості.

### **Висновки до розділу 3**

1. Проаналізовано процес ТМО в термостаті методом фазового простору, як одним із способів якісного аналізу стану системи. Встановлено принципові відмінності фазового портрету ефекту ІнТМО (ТМО з енергією активації) від ТМО без енергії активації в термостаті, які полягають у наявності ділянки фазової траєкторії у негативній області фазового простору. Доведено, система «оточуюче середовище – внутрішнє середовище термостата» є проточною по відношенню до теплової енергії та маси системою, в якій спостерігаються процеси самоорганізації, що у сукупності обумовлює ефективне розсіювання теплової енергії за рахунок фазових

переходів I роду. Відзначено, що для такої системи виділяють дві групи параметрів: параметри порядку – внутрішні властивості системи, які визначають масштаб ІнтМО та його кінетику; керуючі параметри – чинники, які дозволяють регулювати потужність ефекту зовнішніми діями.

2. Встановлено, одним із параметрів порядку ефекту ІнтМО є властивість рідини всередині термостата переходити до газового стану, обумовлена взаємодією її з оточенням – сухими речовинами, з точки зору практичного застосування ІнтМО – властивість сировини утримувати рідину. Введено для рідини всередині термостата поняття «системна рідина» або «системна вода», як рідка частина, що знаходиться в об'ємі харчової системи всередині термостата впродовж часу не меншого за характерний час технологічної операції та яка визначає перебіг ТМО і функціонально-технологічні властивості цієї харчової системи. Обґрунтовано доцільність розрахунку мольних концентрацій для харчових систем, що утворюють систему «вода – складові харчової системи». Доведено ґрунтовність такого аналізу, яка полягає у тому, що прагнення до рівноваги між агрегатними станами води є основним кінетичним та енергетичним чинником ефективності реалізації обраної технології.

3. Низькотемпературним калориметричним методом визначена відносна частка системної води, яка визначає швидкість випаровування води з одиниці площі поверхні за визначених тиску і температури під час ІнтМО для різних харчових систем, що являють собою КТ, для яких ТМО є частиною технологічної обробки. Встановлено, що внесення таких добавок як пектин, цукор, еламін, крохмаль, концентрати тваринних білків (Сканпро 91, 95), напівфабрикат кістковий харчовий у сировину рослинного та тваринного походження приводить до зменшення на 10...20% кількості системної води, яка приймає участь у ІнтМО. Відзначено, що частина системної води, яка не випаровується за температури менше 100 °С, не замерзає за температури 0 °С, не витікає тощо, визначає вимоги до умов зберігання харчової сировини та продуктів.

4. Методом ЕПР-спінових міток встановлено, що системна вода модельних тіл із крохмалю та з клейковини має дві форми зв'язку з сухими речовинами, при цьому встановлено, що для тіл із крохмалю наявні три структури, які визначаються молярною масою високомолекулярного сполучення, яким є крохмаль.

5. Дослідженнями ефекту ІнТМО за умови найпростішого варіанту його організації в термостаті з обтюратором, що утримує рідину та газ, за температури термостата більшої за температуру кипіння рідини, яка знаходиться у його внутрішньому виділеному об'ємі, встановлена неможливість досягнення даною рідиною температури кипіння. Встановлено, що за умови використання суміші етилового спирту та води у якості рідини під час ІнТМО, етиловий спирт та вода переходять до газового стану окремо. Відзначено, з точки зору практичного застосування ІнТМО у харчовій промисловості дана особливість може бути використана для таких операцій як ректифікація, перегонка, дистиляція без фази кипіння. Відмічено, перетин кінетик температури складових внутрішнього середовища термостата є відбиттям їх теплофізичних властивостей, що може бути використано для їх дослідження, а термостат з ІнТМО – як лабораторне обладнання.

6. Моделюванням ІнТМО за наявності твердої, рідкої та газової фаз всередині термостата з розривами між фазами встановлено основний параметр порядку ефекту ІнТМО – наявність суцільності газового середовища всередині термостата за парціальним тиском пари рідини. Доведено, за умови забезпечення даного параметра порядку ефект ІнТМО можливий навіть за умови просторового відділення сухих речовин і рідини. Встановлено, наявність розривів в рідкій та твердій фазах всередині термостата сумірних за розмірами з габаритними розмірами внутрішньої частини термостата не вносить видимих змін у характер протікання ефекту ІнТМО. Розрахунками доведено, питома продуктивність робочої поверхні термостата з ІнТМО в 1,7 рази більша у порівнянні з продуктивністю випаровування з відкритої поверхні води за тих же температури (75 °C) та

швидкості руху ( $v=10 \text{ м/с}$ ) над поверхнею, що вигідно вирізняє ІнТМО. Дослідженнями обробки з ІнТМО сировини з високою поруватістю або високим ступенем усадки, сировини з частинками, що мають газонепроникні включення, доведено феноменологічну гіпотезу ефекту ІнТМО та те, що границя розділу «навколишнє середовище – внутрішнє середовище термостата» знаходиться в об'ємі обтюратора, а газове середовище всередині термостата є суцільним за парціальним тиском пари рідини. Встановлено, під час ІнТМО має місце «спрямованість» характеру протікання процесу ТМО, тобто особливості перетікання ІнТМО у будь-якому виділеному об'ємі внутрішнього середовища термостата відбиваються на характері його перетікання для інших виділених об'ємів. Відзначено, наявність такої «спрямованості» є ознакою керованості ІнТМО та його універсальності по сировині, тобто існує можливість обробки різної сировини в одному апараті без його змішування.

7. Отримано кінетику температури та кінетику вологовмісту ККПТ у внутрішньому середовищі термостата як функцію координат, температури термостата та тривалості ІнТМО. Отримані функціональні залежності є вихідними даними для побудування фазових траєкторій ефекту за різних керуючих параметрів та знаходження аналітичного вигляду функції розвитку потужності дисипативних структур ККПТ всередині термостата і таких величин, як коефіцієнт теплопровідності, теплоємність і густина ККПТ.

8. Розрахунками теплового балансу під час ІнТМО встановлено, що за даного ефекту наявний дефіцит теплоти в термостаті, який складає 25...30% від необхідної кількості. Відзначено, що даний факт свідчить про виконання роботи над системою, яка індукується потоком повітря, що рухається відносно обтюратора термостата. Зовнішня робота потоку повітря, який рухається відносно обтюратора, забезпечує по величині енергію активації  $E_A$  ефекту ІнТМО. Доведено, робота потоку повітря, що рухається відносно обтюратора, є тим керуючим параметром, за допомогою якого організовується «запуск» ІнТМО. Доведено при цьому, що температура і

витрати повітря не чинять істотного впливу на характер ІнТМО і не є баластом енергії. Визначено дослідженнями ефекту ІнТМО за різної швидкості потоку повітря відносно обтюраторів, що інтенсивність ІнТМО може регулюватися в межах 15...20% швидкістю потоку повітря в межах від 4 до 13 м/с. Встановлено, що за кутів обдування обтюраторів від 35° до 55° енергоефективність ІнТМО, менша у 2 рази порівняно з кутами 0° та 90°, за яких досягається найбільша енергоефективність. Доведено, що за умови збереження суцільності середовища за парціальним тиском пари рідини, габаритний розмір внутрішнього виділеного об'єму термостата не має обмежень з точки зору реалізації ефекту ІнТМО.

9. Дослідженнями проведеними в даному розділі доведено феноменологічну гіпотезу ефекту ІнТМО, наведену в розділі 2.



## РОЗДІЛ 4

### ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТУ ІНДУКОВАНОГО ТЕПЛОМАСООБМІНУ

#### 4.1 Наближене розв'язання задач теорії тепломасообміну з використанням методу R-функцій

Ефективність інтенсифікації процесів тепло- та масообміну в термостаті з вологим ККПТ у його внутрішньому виділеному об'ємі лежить на шляху дослідження математичних моделей з урахуванням широкого діапазону змін теплофізичних параметрів та межових умов. При значних градієнтах температури взаємний вплив процесів тепло- та масообміну призводить до появи нових механізмів ТМО, вияви та дослідження яких можна здійснювати на основі аналізу початково-межових задач теорії ТМО. Розв'язки задач теорії ТМО про розподілення температури і вологовмісту в термостаті з трьома фазами, надають можливість виявляти особливості механізму і рушійні сили для процесів тепло- та масообміну та ефективно керувати ними [243-250].

Під час розгляду широкого класу крайових задач різної фізичної природи виникає необхідність у вирішенні диференціальних рівнянь в частинних похідних, в яких досліджувана область має складну конфігурацію. У таких випадках, як правило, використовуються чисельні методи: сіткові [251], варіаційні [252] та проєкційні [253]. Однак, кожен з них має свої переваги і недоліки. Так, сіткові методи володіють великою ефективністю алгоритму, але при цьому не точно враховують геометрію досліджуваного об'єкта. У разі варіаційних методів не завжди можна побудувати базисні функції, які задовольняли б всім необхідним умовам, тому їх використання обмежене [254]. Слід відмітити метод R-функцій [255], що володіє геометричною гнучкістю і універсальністю по відношенню до вибраного способу мінімізації функціоналу [256].

В теорії ТМО всебічно досліджені розв'язки задач лише для таких форм тіл, для яких використовуються інтегральні перетворення (необмежена пластина, циліндр нескінченної висоти, куля) [251-253]. У той же час такі практичні форми, як паралелепіпед, півкуля (або інші частини кулі), циліндр скінченної довжини, похила призма та ін., не стають предметом аналітичних досліджень. Це зумовлено тим, що будь-який метод повинен урахувати як аналітичну, так і геометричну інформацію задачі [253, 254].

Метою даного етапу дослідження є наближений розв'язок задач теорії ТМО з використанням методу R-функцій та застосування їх для описання ефекту ІнТМО [257-259].

#### 4.1.1 Розв'язок задачі про розподіл температури і вологовмісту у внутрішньому виділеному об'ємі термостата циліндричної форми, що містить три фази

Першим етапом даного дослідження є отримання розв'язку задачі про розподіл температури і вологовмісту у внутрішньому виділеному об'ємі термостата циліндричної форми, що утримує три фази, при межових умовах третього роду з використанням методу R-функцій сумісно з методом малого параметра. Другим етапом є узагальнення результатів з урахуванням комбінації межових умов третього і першого роду.

Нехай нормальний перетин нескінченного циліндричного ККПТ площиною  $x_1Ox_2$  має форму області  $\Omega$  з межею  $\partial\Omega$ . В області  $\Omega$  маємо безрозмірну систему рівнянь [260]:

$$\Delta T(x, Fo) - \frac{\partial T(x, Fo)}{\partial Fo} = \varepsilon \frac{\partial U(x, Fo)}{\partial Fo},$$

$$Lu\Delta U(x, Fo) = \frac{\partial U(x, Fo)}{\partial Fo} + LuPn\Delta T(x, Fo). \quad (4.1)$$

При наступних межових і початкових умовах:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T(x, Fo)}{\partial n} + Bi_q T(x, Fo) &= Bi_q - (1 - \varepsilon_\phi) Ko Lu Ki_m(Fo), \\ \frac{\partial U(x, Fo)}{\partial n} - Pn \frac{\partial T(x, Fo)}{\partial n} &= Ki_m(Fo), \quad x \in \partial\Omega, \\ T(x, Fo) = U(x, Fo) &= 0, \quad Fo = 0. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Рівності (4.1), (4.2) записані в безрозмірних величинах [260]  
 $x = (x_1, x_2)$ ,  $x_i = \frac{\bar{x}_i}{R}$  ( $i = 1, 2$ ),  $Fo = \frac{a\bar{\tau}}{R^2}$ ,  $\bar{\tau} \in [0, \tau_0]$ ,  $U = \frac{U_0 - \bar{U}}{U_0}$ ,  $T = \frac{\bar{t} - t_0}{t_0}$   
(рискою відмічені розмірні величини);  $\Delta$  – оператор Лапласа;  $\varepsilon_\phi$  – критерій фазового перетворення;  $n$  – зовнішня нормаль до  $\partial\Omega$ ;  $a$  – коефіцієнт теплопровідності;  $R$  – постійна, яка має розмірність довжини;  $U_0$ ,  $t_0$  – початкові вологовміст і температура;  $Fo$  – критерій Фур'є,  $Pn$  – критерій Поснова;  $Lu$  – критерій Ликова;  $Bi_q$  – тепловий критерій Біо;  $Ki_m(Fo)$  – масообмінний критерій Кірпічова (залежний від критерію Фур'є  $Fo$ );  $Ko$  – критерій Косовича.

Параметр зв'язності  $\varepsilon$  ( $\varepsilon = \varepsilon_\phi Ko$ ), який входить в перше рівняння системи (4.1), характеризує взаємодію полів вологовмісту та температури ( $\varepsilon < 1$ ).

Замінімо в (4.1) похідні за критерієм  $Fo$  різницевиими аналогами

$$\begin{aligned} \frac{\partial T(x, Fo)}{\partial Fo} &= \frac{T(x, Fo_k) - T(x, Fo_{k-1})}{h_{Fo}}, \\ \frac{\partial U(x, Fo)}{\partial Fo} &= \frac{U(x, Fo_k) - U(x, Fo_{k-1})}{h_{Fo}}, \end{aligned}$$

де  $h_{Fo} = \frac{Fo_0}{N}$  – крок розбиття проміжку зміни критерію  $Fo$

( $Fo \in [0, Fo_0]$ ,  $Fo_0 = \frac{a\tau_0}{R^2}$ ) на  $N$  частин,  $Fo_k = kh_{Fo}$  ( $k = 1, 2, \dots, N$ ).

Одержуємо послідовність стаціонарних межових задач (значення всіх величин в момент  $Fo_k$  будемо позначати верхнім індексом « $k$ »):

$$\Delta T^{(k)} - \frac{1}{h_{Fo}} T^{(k)} = -\frac{1}{h_{Fo}} T^{(k-1)} + \frac{\varepsilon}{h_{Fo}} (U^{(k)} - U^{(k-1)}), \quad (4.3)$$

$$Lu\Delta U^{(k)} - \frac{1}{h_{Fo}} U^{(k)} = -\frac{1}{h_{Fo}} U^{(k-1)} + LuPn\Delta T^{(k)}, \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial T^k}{\partial n} + Bi_q T^{(k)} = q_1^{(k)}, \quad x \in \partial\Omega, \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial U^k}{\partial n} + Pn \frac{\partial T^{(k)}}{\partial n} = q_2^{(k)}, \quad x \in \partial\Omega, \quad (4.6)$$

$$T^{(0)} = 0, \quad U^{(0)} = 0, \quad k = 1, 2, \dots, N.$$

Тут введені позначення  $T^{(k)}(x) = T(x, kh_{Fo})$ ,  $U^{(k)}(x) = U(x, kh_{Fo})$ ,  $q_1^{(k)} = Bi_q - (1 - \varepsilon_\phi) KoLuKi_m(k \cdot h_{Fo})$ ,  $q_2^{(k)} = Ki_m(k \cdot h_{Fo})$ .

У відповідності до методу малого параметра розв'язання межової задачі (4.3)-(4.6) на кожному фіксованому шарі  $Fo_k$  ( $k = 1, 2, \dots, N$ ) будемо шукати у вигляді степеневих рядів по параметру  $\varepsilon$ :

$$T^{(k)} = \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon^m T_m^{(k)}, \quad U^{(k)} = \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon^m U_m^{(k)}. \quad (4.7)$$

Відмітимо, що коефіцієнти розв'язання  $T_m^{(k)}$  і  $U_m^{(k)}$  ( $m = 0, 1, 2, \dots$ ) не залежать від  $\varepsilon$ , а  $T_0^{(k)}$ ,  $U_0^{(k)}$  – розв'язки при  $\varepsilon = 0$ . Шляхом підстановки (4.7)

в (4.3)-(4.6) і порівняння коефіцієнтів при однакових степенях  $\varepsilon$ , одержуємо для визначення нульового наближення  $T_0^{(k)}$ ,  $U_0^{(k)}$  задачі:

$$\Delta T_0^{(k)} - \frac{1}{h_{Fo}} T_0^{(k)} = -\frac{1}{h_{Fo}} T_0^{(k-1)}, \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial T_0^{(k)}}{\partial n} + Bi_q T_0^{(k)} = q_1^{(k)}, \quad x \in \partial\Omega$$

та

$$Lu\Delta U_0^{(k)} - \frac{1}{h_{Fo}} U_0^{(k)} = -\frac{1}{h_{Fo}} U_0^{(k-1)} + LuPn\Delta T_0^{(k)}, \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial U_0^{(k)}}{\partial n} - Pn \frac{\partial T_0^{(k)}}{\partial n} = q_2^{(k)}, \quad x \in \partial\Omega,$$

$$T^{(0)} = 0, \quad U^{(0)} = 0.$$

Подальші наближення  $T_m^{(k)}$ ,  $U_m^{(k)}$  ( $m = 0, 1, 2, \dots$ ) знаходяться як розв'язки задач:

$$\Delta T_m^{(k)} - \frac{1}{h_{Fo}} T_m^{(k)} = \frac{1}{h_{Fo}} (U_{m-1}^{(k)} - \gamma_m U^{(k-1)}), \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial T_m^{(k)}}{\partial n} + Bi_q T_m^{(k)} = 0, \quad x \in \partial\Omega$$

та

$$Lu\Delta U_m^{(k)} - \frac{1}{h_{Fo}} U_m^{(k)} = LuPn\Delta T_m^{(k)}, \quad (4.11)$$

$$\frac{\partial U_m^{(k)}}{\partial n} - Pn \frac{\partial T_m^{(k)}}{\partial n} = 0, \quad x \in \partial\Omega,$$

$$T^{(0)} = 0, \quad U^{(0)} = 0, \quad \gamma_m = \begin{cases} 1, & m = 1 \\ 0, & m > 1 \end{cases}.$$

Замітимо, що верхнім індексом « $k$ » позначається відповідність розглядуваних величин  $k$ -тому шару за критерієм  $Fo$ , а нижнім індексом « $m$ » – місце тих же величин в розвиненнях в ряди по степеням  $\varepsilon$  для вологовмісту та температури.

Для побудови наближеного розв'язку межових задач (4.10), (4.11) використаємо метод  $R$ -функцій, а саме, запишемо структурні формули для коефіцієнтів розвинення температури  $T_m^{(k)}$  та вологовмісту  $U_m^{(k)}$  у такому вигляді, щоб відповідні межові умови задовольнялися точно. Структура розв'язку для задачі (4.10) має вигляд:

$$T_m^{(k)} = \Phi_m^{(k)} - \omega D_1 \Phi_m^{(k)} - \omega (Bi_q \Phi_m^{(k)} - \delta_m q_1^{(k)}), \quad (4.12)$$

а для задачі (4.11) записується так:

$$U_m^{(k)} = \Psi_m^{(k)} - \omega D_1 \Psi_m^{(k)} - \omega (Pn D_1 T_m^{(k)} - \delta_m q_2^{(k)}), \quad (4.13)$$

$$\delta_m = \begin{cases} 1, & m = 0 \\ 0, & m \geq 1 \end{cases}$$

Тут  $\Phi_m^{(k)}$ ,  $\Psi_m^{(k)}$  – довільні компоненти структур (4.12) і (4.13) відповідно, при будь-якому виборі яких, межові умови задовольняються точно. Функція  $\omega(x)$  є лівою частиною нормалізованого до першого порядку рівняння межі  $\partial\Omega$  та має такі властивості:  $\omega > 0$  в  $\Omega$ ,  $\omega = 0$ ,  $\frac{\partial\omega}{\partial n} = -1$  на  $\partial\Omega$ .

Оператор  $D_1$  визначається формулою:

$$D_1 = \frac{\partial\omega}{\partial x_1} \frac{\partial}{\partial x_1} + \frac{\partial\omega}{\partial x_2} \frac{\partial}{\partial x_2} \quad (4.14)$$

і є продовженням оператора  $\frac{\partial}{\partial n}$  в  $\Omega$ , а його змінні коефіцієнти  $\frac{\partial \omega}{\partial x_1}$  та  $\frac{\partial \omega}{\partial x_2}$

перетворюються на  $\partial\Omega$  в напрямні косинуси нормалі, а саме:

$$\cos(n, x_1) = \frac{\partial \omega}{\partial x_1}, \quad \cos(n, x_2) = \frac{\partial \omega}{\partial x_2}. \quad (4.15)$$

Для побудови функції  $\omega(x)$  скористаємось  $R$ -операціями [255, 256]:

$$\begin{aligned} x \wedge_0 y &= x + y - \sqrt{x^2 + y^2} \text{ – } R\text{-кон'юнкція,} \\ x \vee_0 y &= x + y + \sqrt{x^2 + y^2} \text{ – } R\text{-диз'юнкція,} \\ \bar{x} &= -x \text{ – } R\text{-заперечення.} \end{aligned} \quad (4.16)$$

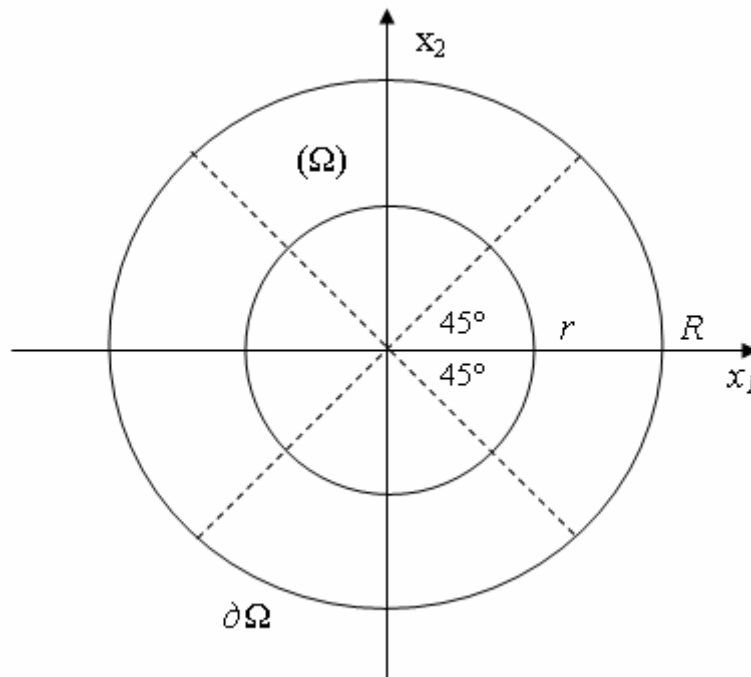


Рисунок 4.1 – Загальний вигляд області  $\Omega$

Так для області  $\Omega$ , зображеній на рис. 4.1, функція  $\omega(x)$  може бути за допомогою  $R$ -операцій записана в такій послідовності [261].

Спочатку, виходячи із загального вигляду області  $\Omega$ , будемо предикатне рівняння цієї області:

$$\Omega = (\Omega_1 \wedge \overline{\Omega_2}) \wedge (\Omega_3 \vee \overline{\Omega_4}), \quad \Omega = \begin{cases} 1, & x \in \Omega \\ 0, & x \notin \Omega \end{cases}. \quad (4.17)$$

Тут  $\wedge, \vee, \overline{\phantom{x}}$  – символи операцій алгебри логіки [262];  $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4$  – опорні області, які визначаються формулами:

$$\Omega_1 \equiv (R^2 - x_1^2 - x_2^2 \geq 0) \text{ (коло радіусу } R \text{ з центром на початку координат);}$$

$$\Omega_2 \equiv (r^2 - x_1^2 - x_2^2 \geq 0) \text{ (коло радіусу } r \text{ з центром на початку координат);}$$

$$\Omega_3 \equiv (x_2 - x_1 \geq 0) \text{ (півплощина вище прямої } x_2 = x_1);}$$

$$\Omega_4 \equiv (x_1 + x_2 \geq 0) \text{ (півплощина вище прямої } x_2 = -x_1).$$

Далі логічні символи замінимо відповідними символами  $R$ -операцій, а позначення опорних областей – їх аналітичним описом [263]. В результаті одержимо аналітичний вираз для функції  $\omega(x)$ , а саме:

$$\omega(x) = \left[ (R^2 - x_1^2 - x_2^2) \wedge_0 (x_1^2 + x_2^2 - r^2) \right] \wedge_0 \left[ (x_2 - x_1) \vee_0 (-(x_1 + x_2)) \right]. \quad (4.18)$$

Одержана функція  $\omega(x)$  задовольняє умові:

$$\omega > 0 \text{ в } \Omega, \quad \omega = 0 \text{ на } \partial\Omega.$$

Для того, щоб забезпечити нормалізованість для цієї функції ( $|\nabla\omega| = 1$  на  $\partial\Omega$ ), необхідно, щоб рівняння відповідних опорних областей були також нормалізованими. Для таких ліній, як коло і пряма, нормалізація



забезпечується введенням для рівнянь постійних множників. Для розглянутих опорних областей маємо:

$$\omega \equiv \left[ \frac{1}{2R} (R^2 - x_1^2 - x_2^2) \wedge \frac{1}{2r} (x_1^2 + x_2^2 - r^2) \right] \wedge_0 \wedge_0 \left[ \frac{1}{\sqrt{2}} (x_2 - x_1) \vee \left( \left( -\frac{1}{\sqrt{2}} (x_1 + x_2) \right) \right) \right] = 0 \quad (4.19)$$

Невизначені компоненти  $\Phi_m^{(k)}$ ,  $\Psi_m^{(k)}$  будемо представляти у вигляді розвинень по елементам деяких повних систем функцій (наприклад [264], степеневих поліномів, поліномів Чебишева, сплайнів):

$$\begin{aligned} \Phi_m^{(k)} &= \sum_{i=1}^{N_1} C_{i,m}^{(k)} \xi_i(x), \\ \Psi_m^{(k)} &= \sum_{i=1}^{N_2} d_{i,m}^{(k)} \eta_i(x). \end{aligned} \quad (4.20)$$

Коефіцієнти  $C_{i,m}^{(k)}$ ,  $d_{i,m}^{(k)}$  будемо знаходити шляхом пошуку мінімуму відповідних функціоналів [265] (для задач (4.8), (4.10)):

$$\begin{aligned} J_1(T_m^{(k)}) &= \iint_{\Omega} \left[ \left( \frac{\partial T_m^{(k)}}{\partial x_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial T_m^{(k)}}{\partial x_2} \right)^2 + \frac{1}{h_{Fo}} (T_m^{(k)})^2 - 2T_m^{(k)} F_m^{(k)} \right] d\Omega + \\ &+ \int_{\partial\Omega} [Bi_q (T_m^{(k)})^2 - 2\delta_m T_m^{(k)} q_1^{(k)}] d(\partial\Omega), \end{aligned} \quad (4.21)$$

$$F_m^{(k)} = \begin{cases} \frac{1}{h_{Fo}} T_m^{(k-1)}, & m = 0 \\ -\frac{1}{h_{Fo}} (U_{m-1}^{(k)} - \gamma_m U^{(k-1)}), & m > 0 \end{cases}$$

та (для задач (4.9), (4.11)):

$$J_2(U_m^{(k)}) = \iint_{\Omega} \left[ Lu \left( \frac{\partial U_m^{(k)}}{\partial x_1} \right)^2 + Lu \left( \frac{\partial U_m^{(k)}}{\partial x_2} \right)^2 + \frac{1}{h_{Fo}} (U_m^{(k)})^2 - 2U_m^{(k)} G_m^{(k)} \right] d\Omega - ,$$

$$- 2 \int_{\partial\Omega} [\delta_m T_m^{(k)} q_1^{(k)}] d(\partial\Omega), \quad (4.22)$$

$$G_m^{(k)} = \begin{cases} \frac{1}{h_{Fo}} U_m^{(k-1)} - Lu P n \Delta T_0^k, & m = 0 \\ - Lu P n \Delta T_m^k, & m > 0 \end{cases}.$$

В подальшому випишемо алгоритм пошуку коефіцієнтів  $C_{i,m}^{(k)}$  та  $d_{i,m}^{(k)}$  розвинень (4.20) [266]. Розвинення для  $T_m^{(k)}$  та  $U_m^{(k)}$  із (4.20) підставимо відповідно в формули (4.12) і (4.13). Одержимо координатні послідовності:

$$T_m^{(k)} = \varphi_{0,m}^{\{k\}} + \sum_{i=1}^{N_1} C_{i,m}^{(k)} \varphi_i, \quad (4.23)$$

$$\varphi_{0,m}^{(k)} = \delta_m \omega q_1^{(k)},$$

$$\varphi_i = \xi_i - \omega D_1 \xi_i - B i_q \omega \xi_i,$$

та

$$U_m^{(k)} = f_{0,m}^{\{k\}} + \sum_{i=1}^{N_1} d_{i,m}^{(k)} f_i, \quad (4.24)$$

$$f_{0,m}^{(k)} = \delta_m \omega q_2^{(k)} + P n \omega D_1 T_m^{(k)},$$

$$f_i = \eta_i - \omega D_1 \eta_i.$$

Функції  $\varphi_{0,m}^{(k)}$ ,  $f_{0,m}^{(k)}$  задовольняють неоднорідним межовим умовам (4.8), (4.10) і (4.9), (4.11) відповідно, а  $\varphi_i$ ,  $f_i$  – відповідним однорідним.

Реалізація умови мінімуму функціоналу (4.21) на множині функцій (4.23) призводить до системи лінійних алгебраїчних рівнянь відносно коефіцієнтів розвинень  $C_{i,m}^{(k)}$ :

$$\sum_{i=1}^{N_1} a_{ji} C_{i,m}^{(k)} = b_{j,m}^{(k)}, \quad j = 1, 2, \dots, N_1, \quad (4.25)$$

де

$$a_{ij} = \iint_{\Omega} \left( \frac{\partial \varphi_j}{\partial x_1} \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_1} + \frac{\partial \varphi_j}{\partial x_2} \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_2} + \frac{1}{h_{Fo}} \varphi_j \varphi_i \right) d\Omega + Bi_q \int_{\partial\Omega} \varphi_j \varphi_i d(\partial\Omega), \quad (4.26)$$

$$b_{j,m}^{(k)} = - \iint_{\Omega} \left( \frac{\partial \varphi_{0,m}^{(k)}}{\partial x_1} \frac{\partial \varphi_j}{\partial x_1} + \frac{\partial \varphi_{0,m}^{(k)}}{\partial x_2} \frac{\partial \varphi_j}{\partial x_2} + \frac{1}{h_{Fo}} \varphi_{0,m}^{(k)} \varphi_j - F_m^{(k)} \varphi_j \right) d\Omega - \\ - Bi_q \int_{\partial\Omega} \left( \varphi_{0,m}^{(k)} \varphi_j - \delta_m q_1^{(k)} \varphi_j \right) d(\partial\Omega). \quad (4.27)$$

Виконуючи аналогічні дії відносно функціоналу (4.22) з урахуванням розвинень (4.24), одержимо нову систему лінійних алгебраїчних рівнянь відносно коефіцієнтів розвинень  $d_{i,m}^{(k)}$ :

$$\sum_{i=1}^{N_1} e_{ji} d_{i,m}^{(k)} = p_{j,m}^{(k)}, \quad j = 1, 2, \dots, N_1, \quad (4.28)$$

$$e_{ij} = \iint_{\Omega} \left( Lu \left( \frac{\partial f_j}{\partial x_1} \frac{\partial f_i}{\partial x_1} + \frac{\partial f_j}{\partial x_2} \frac{\partial f_i}{\partial x_2} \right) + \frac{1}{h_{Fo}} f_j f_i \right) d\Omega, \quad (4.29)$$

$$p_{j,m}^{(k)} = \iint_{\Omega} \left( Lu \left( \frac{\partial f_{0,m}^{(k)}}{\partial x_1} \frac{\partial f_j}{\partial x_1} + \frac{\partial f_{0,m}^{(k)}}{\partial x_2} \frac{\partial f_j}{\partial x_2} \right) + G_m^{(k)} f_j \right) d\Omega + \delta_m \int_{\partial\Omega} q_2^{(k)} f_j d(\partial\Omega). \quad (4.30)$$

Аналізуючи матриці коефіцієнтів і праві частини системи лінійних алгебраїчних рівнянь (4.25) та (4.28), необхідно відмітити наступне:

1. коефіцієнти  $a_{i,j}$  і  $e_{i,j}$  ( $i, j = 1, 2, \dots, N_1$ ) формуються з елементів координатних послідовностей, які задовольняють лише однорідним межовим умовам і не залежать від індексів « $m$ » і « $k$ », а тому обчислюються один раз на початку обчислювального процесу, тобто при  $k = 1$  і  $m = 0$ ;

2. коефіцієнти  $b_{j,m}^{(k)}$  і  $p_{j,m}^{(k)}$ , які складають праві частини систем (4.25) і (4.28) відповідно, обчислюються на кожному шарі  $Fo_k$  ( $k=1,2,\dots,N$ ) і кожному наближенні  $m$  ( $m=0,1,2,\dots$ ).

Оптимальну товщину шару  $h_{Fo}$ , а також кількість наближень  $m$  для одержання температури  $T(x)$  і вологовмісту  $U(x)$  достатньої точності можна встановити в результаті проведення чисельних експериментів. Всі коефіцієнти систем (4.25) і (4.28) знаходяться при обчисленні інтегралів як по області  $\Omega$ , так і по контуру  $\partial\Omega$ . Такі обчислення можна ефективно здійснювати з використанням квадратурних формул Гауса заданого порядку.

Таким чином, запропоновано розвиток методу  $R$ -функцій сумісно з методом малого параметра стосовно до розв'язання задач тепло та масообміну.

Узагальнимо запроповану методику розв'язання задачі про розподіл вологовмісту та температури ускладненням межових умов, коли на бічній поверхні задано комбінацію умов третього та першого роду. Будемо вважати, що вся поверхня  $\partial\Omega$  тіла  $\Omega$  має складові  $\partial\Omega_1$  і  $\partial\Omega_2$  ( $\partial\Omega = \partial\Omega_1 \cup \partial\Omega_2$ ). На частині поверхні  $\partial\Omega_1$  задано умову третього роду, а на другій частині  $\partial\Omega_2$  – умову першого роду. Тоді межові умови задач (4.8), (4.9) та (4.10), (4.11) замінюються на такі:

межова умова А

$$\frac{\partial T_m^{(k)}}{\partial n} + Bi_q T_m^{(k)} = \delta_m q_1^{(k)}, \quad x \in \partial\Omega_1, \quad (4.31)$$

$$T_m^{(k)} = \delta_m T_n, \quad x \in \partial\Omega_2; \quad (4.32)$$

та межова умова В

$$\frac{\partial U_m^{(k)}}{\partial n} + Pn \frac{\partial T_m^{(k)}}{\partial n} = \delta_m q_2^{(k)}, \quad x \in \partial\Omega_1, \quad (4.33)$$

$$U_m^{(k)} = \delta_m U_n, \quad x \in \partial\Omega_2; \quad (4.34)$$

$$\delta_m = \begin{cases} 1, & m = 0 \\ 0, & m \geq 1 \end{cases}, \quad \partial\Omega_1 \cup \partial\Omega_2 = \partial\Omega. \quad (4.35)$$

Тут  $T_n$ ,  $U_n$  – відповідно постійні безрозмірні температура та вологовміст, які визначені на  $\partial\Omega_2$ . У відповідності до умови А структура розв'язку (4.12) замінюється і записується формулою:

$$T_m^{(k)} = \Phi_{1,m}^{(k)} - \frac{\omega_1 \omega_2}{\omega_1 + \omega_2} D_1^{(1)} \Phi_{1,m}^{(k)} - \frac{\omega_1 \omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \left( Bi_q \Phi_{1,m}^{(k)} - \delta_m \frac{\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} q_1^{(k)} \right), \quad (4.36)$$

$$\Phi_{1,m}^{(k)} = \delta_m T_n + \omega_1 \Phi_m^{(k)}, \quad D_1^{(1)} = \frac{\partial \omega_1}{\partial x_1} \frac{\partial}{\partial x_1} + \frac{\partial \omega_1}{\partial x_2} \frac{\partial}{\partial x_2}, \quad (4.37)$$

де  $\omega_1$  – ліва частина нормалізованого рівняння ділянки  $\partial\Omega_2$ .

Структура (4.13) також змінюється і у відповідності до межевої умови В та подається формулою:

$$U_m^{(k)} = \Psi_{1,m}^{(k)} - \frac{\omega_1 \omega_2}{\omega_1 + \omega_2} D_1^{(1)} \Phi_{1,m}^{(k)} - \frac{\omega_1 \omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \left( Pn D_1^{(1)} \Phi_{1,m}^{(k)} - \delta_m \frac{\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} q_2^{(k)} \right), \quad (4.38)$$

$$\Psi_{1,m}^{(k)} = \delta_m U_n + \omega_1 \Phi_1^{(k)}. \quad (4.39)$$

Як і раніше  $\Phi_m^{(k)}$ ,  $\Psi_m^{(k)}$  – невизначені компоненти структур розв'язків.

Для їх знаходження має місце запропонована вище схема, в якій лише необхідно одновимірні інтеграли в формулах (4.21), (4.22) обчислювати не по  $\partial\Omega$ , а по тій її частині, де задані умови третього роду, тобто по  $\partial\Omega_1$ .

Отримані розв'язки використовуються для побудовання розподілення температури під час ІнтМО у внутрішньому виділеному об'ємі термостата циліндричної форми, що містить три фази: газову, рідку та тверду.

#### 4.1.2 Розв'язок задачі про розподіл температури та вологовмісту у внутрішньому виділеному об'ємі термостата паралелепіпедної форми, що містить три фази

Для знаходження розподілення температури та вологовмісту під час ІнтМО у внутрішньому виділеному об'ємі термостата паралелепіпедної форми, що містить три фази: газову, рідку та тверду (ККПТ), пропонується математична модель процесу у вигляді системи нестационарних рівнянь у частинних похідних із заданими початковими та межовими умовами. Наявність часової складової та прагнення враховувати реальні просторові геометричні форми внутрішнього виділеного об'єму термостата ускладнюють математичну модель задачі. Вказані труднощі подолано сумісним використанням  $R$ -функцій і проекційного методу Бубнова–Гальоркіна [267-269]. Запропонована форма розв'язку початково-крайової задачі точно враховує геометричну форму внутрішнього виділеного об'єму термостата та межові умови. Етап одержання числових розв'язків завершується розв'язанням системи звичайних диференціальних рівнянь з початковими умовами, що сформовані проекційним методом.

Для пошуку невизначених компонент структур пропонується алгоритм, основу якого становить проекційний метод Бубнова–Гальоркіна [270]. Розглянемо в просторі  $Ox_1x_2x_3$  ККПТ  $\Omega$  з межею  $\partial\Omega$ . В області  $\Omega$  маємо безрозмірну систему рівнянь [270]:

$$\frac{\partial T(x, Fo)}{\partial Fo} = (1 + Ko^* PnLu)\Delta T - Ko^* Lu\Delta U,$$

$$\frac{\partial U(x, Fo)}{\partial Fo} = Lu\Delta U - LuPn\Delta T. \quad (4.40)$$

За наступних межових (третього роду) і початкових умов:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T(x, Fo)}{\partial n} + \beta_{11}T(x, Fo) + \beta_{12}U(x, Fo) &= q_1, \quad x \in \partial\Omega, \\ \frac{\partial U(x, Fo)}{\partial n} + \beta_{21}U(x, Fo) + \beta_{22}T(x, Fo) &= q_2, \quad x \in \partial\Omega, \\ T(x, Fo) = U(x, Fo) &= 0, \quad Fo = 0. \end{aligned} \quad (4.41)$$

Відзначимо, що межові умови третього роду (4.41) враховують найбільш типовий вид залежності безрозмірного потоку від вологовмісту:

$$Ki_m = Bi_m(1 - U(x, Fo)). \quad (4.42)$$

Рівності (4.40), (4.41) записані в безрозмірних величинах:

$$x = (x_1, x_2, x_3), \quad x_i = \frac{\bar{x}_i}{R} \quad (i = 1, 2, 3), \quad Fo = \frac{a\bar{\tau}}{R^2}, \quad \bar{\tau} \in [0, \bar{\tau}_0], \quad U = \frac{U_0 - \bar{U}}{U_0},$$

$T = \frac{\bar{T} - T_0}{T_0}$  (рискою відзначені розмірні величини);  $\Delta$  – тривимірний оператор

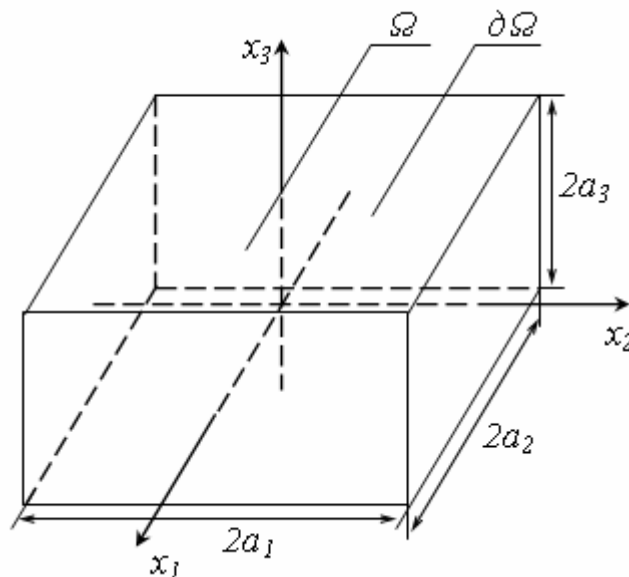
Лапласа;  $n$  – зовнішня нормаль до  $\partial\Omega$ ;  $a$  – коефіцієнт температуропровідності;  $R$  – постійна, яка має розмірність довжини;  $U_0, T_0$  – початкові вологовміст і температура;  $Fo$  – критерій Фур'є,  $Pn$  – критерій Поснова;  $Lu$  – критерій Ликова;  $Bi_q$  – тепловий критерій Біо;  $Bi_m$  – масообмінний критерій Біо;  $Ki_m(Fo)$  – масообмінний критерій Кірпічова (залежний від критерію Фур'є  $Fo$ );  $Ko^* = \varepsilon Ko$ ,  $\varepsilon$  – критерій фазового перетворення;  $Ko$  – критерій Косовича;  $\beta_{11} = Bi_q$ ,  $\beta_{12} = -(1 - \varepsilon)Bi_m Ko Lu$ ,

$$\beta_{21} = (1 - (1 - \varepsilon)KoLuPn)Bi_m, \quad \beta_{22} = PnBi_q, \quad q_1 = Bi_q - (1 - \varepsilon)KoLuBi_m, \\ q_2 = PnBi_m + (1 - (1 - \varepsilon)KoLuPn)Bi_m.$$

Будемо вважати  $\Omega$  – прямокутний паралелепіпед (рис. 4.2), який є перетином трьох площин:  $x_1 = \pm a_1$ ,  $x_2 = \pm a_2$ ,  $x_3 = \pm a_3$ . Його нормалізоване рівняння можна записати формулою:

$$\omega = \left( \frac{1/4 a_1^2 - x_1^2}{a_1} \wedge_0 \frac{1/4 a_2^2 - x_2^2}{a_2} \right) \wedge_0 \frac{1/4 a_3^2 - x_3^2}{a_3}, \quad (4.43)$$

де  $\omega > 0$  в  $\Omega$ ;  $\omega = 0$ ,  $|\nabla \omega| = 1$  на  $\partial\Omega$ .



**Рисунок 4.2 – Внутрішній виділений об'єм термостата паралелепіпедної форми**

Побудуємо структурні формули для компонент  $T(x, Fo)$ ,  $U(x, Fo)$  нестационарної крайової задачі (4.40), (4.41) таким чином, щоб межові умови (4.41) задовольнялися точно. Нехай  $\omega(x) = 0$  – нормалізоване до першого порядку ( $|\nabla \omega(x)| = 1$ ) рівняння межі  $\partial\Omega$  області  $\Omega$ , яке будується за допомогою  $R$ -функцій. Умова нормалізованості лівої частини рівняння дозволяє записати диференціальний оператор:



$$D_2 = \frac{\partial \omega}{\partial x_1} \frac{\partial}{\partial x_1} + \frac{\partial \omega}{\partial x_2} \frac{\partial}{\partial x_2} + \frac{\partial \omega}{\partial x_3} \frac{\partial}{\partial x_3}, \quad (4.44)$$

який визначений в області  $\Omega$ , а на  $\partial\Omega$  збігається з похідною за напрямком нормалі  $\frac{\partial}{\partial n}$ . Коефіцієнти  $\frac{\partial \omega}{\partial x_i}$  ( $i=1,2,3$ ) оператора (4.44) збігаються на

$$\partial\Omega \text{ з напрямними косинусами нормалі } \cos(n, x_i) = \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \Big|_{\partial\Omega} \quad (i=1,2,3).$$

Для побудови функції  $\omega(x)$  скористаємося  $R$ -операціями (4.16):  $R$ -кон'юнкцією  $x \wedge_0 y = x + y - \sqrt{x^2 + y^2}$ ;  $R$ -диз'юнкцією  $x \vee_0 y = x + y + \sqrt{x^2 + y^2}$ ;  $R$ -запереченням  $\bar{x} = -x$ .

Межові умови (4.41), які визначені на  $\partial\Omega$ , продовжимо в  $\Omega$  за допомогою оператора  $D_2$ :

$$D_2 T + \beta_{11} T + \beta_{12} U = q_1 + \omega \xi_0, \quad D_2 U + \beta_{21} U + \beta_{22} T = q_2 + \omega \eta_0. \quad (4.45)$$

Вирази (4.45) визначені в  $\Omega \cup \partial\Omega$ , а  $\xi_0, \eta_0$  – довільні функції. Структуру розв'язку будемо представляти функціями:

$$T = \Phi_1 + \omega \Phi_2, \quad U = \Psi_1 + \omega \Psi_2, \quad (4.46)$$

де  $\Phi_i, \Psi_i$  ( $i=1,2$ ) – довільні функції.

Підставимо (4.46) в (4.45). З урахуванням формули  $D_2 \omega = 1 + O(\omega^2)$  та об'єднанням довільних функцій, що містять множник  $\omega$ , одержимо:

$$\begin{aligned} D_2 \Phi_1 + \Phi_2 + \beta_{11} \Phi_1 + \beta_{12} \Psi_1 &= q_1 + \omega \xi_1, \\ D_2 \Psi_1 + \Psi_2 + \beta_{21} \Psi_1 + \beta_{22} \Phi_1 &= q_2 + \omega \eta_1, \end{aligned} \quad (4.47)$$

де  $\xi_1, \eta_1$  – нові довільні функції.

Виразимо  $\Phi_2, \Psi_2$  із (4.47) та підставимо в (4.46). Одержимо структуру розв'язку:

$$\begin{aligned} T(x, Fo) &= \Phi_1 - \omega D_2 \Phi_1 - \beta_{11} \omega \Phi_1 - \beta_{12} \omega \Psi_1 + \omega q_1, \\ U(x, Fo) &= \Psi_1 - \omega D_2 \Psi_1 - \beta_{21} \omega \Psi_1 - \beta_{22} \omega \Phi_1 + \omega q_2. \end{aligned} \quad (4.48)$$

У формулах (4.48)  $\Phi_1(x, Fo), \Psi_1(x, Fo)$  – невизначені компоненти, незалежно від вибору яких межові умови (4.41) задовольняються точно. Свободою у виборі функцій  $\Phi_1, \Psi_1$  скористаємося для наближеного задовільнення системи диференціальних рівнянь (4.40) проекційним методом.

Невизначені компоненти  $\Phi_1(x, Fo), \Psi_1(x, Fo)$  структурних формул (4.48) будемо представляти розвиненням за елементами деяких повних систем функцій (наприклад, степеневих поліномів, сплайнів тощо):

$$\Phi_1(x, Fo) = \sum_{i=1}^{n_1} C_i^{(1)}(Fo) \varphi_i^{(1)}(x); \quad \Psi_1(x, Fo) = \sum_{i=1}^{n_1} C_i^{(2)}(Fo) \varphi_i^{(2)}(x). \quad (4.49)$$

Тут  $C_i^{(1)}(Fo), C_i^{(2)}(Fo)$  – коефіцієнти розвинень, які підлягають визначенню;  $\varphi_i^{(1)}(x), \varphi_i^{(2)}(x)$  – елементи повних систем функцій. Підставимо (4.49) в (4.48). Одержимо нове представлення структурних формул:

$$\begin{aligned} T(x, Fo) &= T_0(x, Fo) + \sum_{i=1}^n C_i(Fo) T_i(x), \\ U(x, Fo) &= U_0(x, Fo) + \sum_{i=1}^n C_i(Fo) U_i(x), \end{aligned} \quad (4.50)$$

де  $T_0(x, Fo) = \omega q_1$ ;

$$T_i(x) = \varphi_i^{(1)}(x) - \omega D_2 \varphi_i^{(1)}(x) - \beta_{11} \omega \varphi_i^{(1)}(x) - \beta_{12} \omega \varphi_{i-n_1}^{(2)}(x);$$

$$U_0(x, Fo) = \omega q_2;$$

$$U_i(x) = \varphi_{i-n_1}^{(2)}(x) - \omega D_2 \varphi_{i-n_1}^{(2)}(x) - \beta_{21} \omega \varphi_{i-n_1}^{(2)}(x) - \beta_{22} \omega \varphi_i^{(1)}(x);$$

$$C_i(Fo) = \begin{cases} C_i^{(1)}(Fo), & i \leq n_1 \\ C_{i-n_1}^{(2)}(Fo), & i > n_1 \end{cases}, \quad n = 2n_1, i = \overline{1, n}.$$

Функції  $U_0(x, Fo)$ ,  $T_0(x, Fo)$  задовольняють неоднорідним межовим умовам (4.41), а послідовності  $U_1(x), U_2(x), \dots, T_1(x), T_2(x), \dots$  – відповідним однорідним. Коефіцієнти  $C_i(Fo)$  знаходимо проєкційним методом у формі Бубнова–Гальоркіна [267, 268]. Для цього два рівняння системи (4.40) запишемо так:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T(x, Fo)}{\partial Fo} - \mu_{11} \Delta T(x, Fo) + \mu_{12} \Delta U(x, Fo) &= 0, \\ \frac{\partial U(x, Fo)}{\partial Fo} - \mu_{21} \Delta U(x, Fo) + \mu_{22} \Delta T(x, Fo) &= 0, \end{aligned} \quad (4.51)$$

де  $\mu_{11} = 1 + Ko^* PnLu$ ,  $\mu_{12} = 1 + Ko^* Lu$ ,  $\mu_{21} = Lu$ ,  $\mu_{22} = LuPn$ .

Підставимо в (4.51) вирази для функцій  $U(x, Fo)$ ,  $T(x, Fo)$  із (4.40).

Одержимо:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_0(x, Fo)}{\partial Fo} + \sum_{i=1}^n C_i'(Fo) T_i(x) - \mu_{11} \left( \Delta T_0(x, Fo) + \sum_{i=1}^n C_i(Fo) \Delta T_i(x) \right) + \\ + \mu_{12} \left( \Delta U_0(x, Fo) + \sum_{i=1}^n C_i(Fo) \Delta U_i(x) \right) &= \delta_1(x, C_1(Fo), \dots, C_n(Fo)), \\ \frac{\partial U_0(x, Fo)}{\partial Fo} + \sum_{i=1}^n C_i'(Fo) U_i(x) - \mu_{21} \left( \Delta U_0(x, Fo) + \sum_{i=1}^n C_i(Fo) \Delta U_i(x) \right) + \\ + \mu_{22} \left( \Delta T_0(x, Fo) + \sum_{i=1}^n C_i(Fo) \Delta T_i(x) \right) &= \delta_2(x, C_1(Fo), \dots, C_n(Fo)), \end{aligned} \quad (4.52)$$

де  $\delta_1, \delta_2$  – нев’язки.

Будемо вимагати, щоб нев’язка  $\delta_1$  була ортогональною до функцій  $T_1(x), T_2(x), \dots$ , а нев’язка  $\delta_2$  була ортогональною до функцій  $U_1(x), U_2(x), \dots$ .

Ця вимога призводить до такої системи диференціальних рівнянь першого порядку відносно коефіцієнтів  $C_j(Fo)$ ,  $j = \overline{1, n}$ :

$$\sum_{j=1}^n (a_{ij} C_j'(Fo) + b_{ij} C_j(Fo)) = d_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (4.53)$$

з відповідними початковими умовами. Початкові значення  $C_1(0), C_2(0), \dots, C_n(0)$  розраховуємо із початкових умов (4.41), як розв’язок системи лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} C_j(0) = e_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (4.54)$$

Коефіцієнти систем (4.53), (4.54) визначаються за формулами:

$$\begin{aligned} a_{ij} &= \int_{\Omega} (T_j T_i + U_j U_i) d\Omega, \\ b_{ij} &= \int_{\Omega} ((-\mu_{11} \Delta T_j + \mu_{12} \Delta U_j) T_i + (-\mu_{21} \Delta U_j + \mu_{22} \Delta T_j) U_i) d\Omega, \\ d_i &= \int_{\Omega} \left( \left( -\frac{\partial T_0}{\partial Fo} + \mu_{11} \Delta T_0 - \mu_{12} \Delta U_0 \right) T_i + \left( -\frac{\partial U_0}{\partial Fo} + \mu_{21} \Delta U_0 - \mu_{22} \Delta T_0 \right) U_i \right) d\Omega, \\ e_i &= -\int_{\Omega} (T_0(x, 0) T_i(x) + U_0(x, 0) U_i(x)) d\Omega. \end{aligned} \quad (4.55)$$

Усі коефіцієнти систем (4.53), (4.54) розраховуються під час обчислення інтегралів по області  $\Omega$ . Такі обчислення можна здійснювати з використанням квадратурних формул Гауса заданого порядку.

Таким чином, запропоновано розвиток методу  $R$ -функцій, який використовується сумісно з проекційним методом Бубнова–Гальоркіна.

Як і в розділі 4.1.1 узагальнимо запропонований розрахунковий алгоритм на випадок комбінації межових умов третього та першого роду на поверхні  $\partial\Omega$  тіла  $\Omega$ . Будемо вважати,  $\partial\Omega_1$  і  $\partial\Omega_2$  дві частини поверхні  $\partial\Omega$  ( $\partial\Omega = \partial\Omega_1 \cup \partial\Omega_2$ ): на  $\partial\Omega_1$  задано умову третього роду, а на  $\partial\Omega_2$  – першого роду. Нехай також  $\omega_1 = 0$  – нормалізоване рівняння ділянки  $\partial\Omega_1$ , а  $\omega_2 = 0$  – рівняння ділянки  $\partial\Omega_2$ . Тоді межові умови (4.41) запишуться формулами:

$$\frac{\partial T(x, Fo)}{\partial n} + \beta_{11}T(x, Fo) + \beta_{12}U(x, Fo) = q_1, \quad x \in \partial\Omega_1, \quad (4.56)$$

$$T(x, Fo) = T_n, \quad x \in \partial\Omega_2; \quad (4.57)$$

$$\frac{\partial U(x, Fo)}{\partial n} + \beta_{21}U(x, Fo) + \beta_{22}T(x, Fo) = q_2, \quad x \in \partial\Omega_1, \quad (4.58)$$

$$U(x, Fo) = U_n, \quad x \in \partial\Omega_2, \quad (4.59)$$

де  $T_n$ ,  $U_n$  – відповідно постійні безрозмірні значення температури та вологовмісту на ділянці  $\partial\Omega_2$ .

Для записаних умов структура розв'язку записується формулами:

$$T(x, Fo) = \Phi_2 - \omega D_2^{(1)}\Phi_2 - \beta_{11}\omega\Phi_2 - \beta_{12}\omega\Psi_2 + \omega \frac{\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} q_1, \quad (4.60)$$

$$\Phi_2 = T_n + \omega_1\Phi_1, \quad (4.61)$$

$$\Psi_2 = U_n + \omega_1\Psi_1, \quad (4.62)$$

$$D_2^{(1)} = \frac{\partial\omega_1}{\partial x_1} \frac{\partial}{\partial x_1} + \frac{\partial\omega_1}{\partial x_2} \frac{\partial}{\partial x_2} + \frac{\partial\omega_1}{\partial x_3} \frac{\partial}{\partial x_3}, \quad (4.63)$$

$$\omega = \frac{\omega_1 \omega_2}{\omega_1 + \omega_2}, \quad (4.64)$$

$$U(x, Fo) = \Psi_2 - \omega D_2^{(1)} \Psi_2 - \beta_{21} \omega \Psi_2 - \beta_{22} \omega \Phi_2 + \omega \frac{\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} q_2, \quad (4.65)$$

У формулах (4.50), які входять в алгоритм пошуку невизначених компонент  $\Phi_1$  і  $\Psi_1$ , змінюються вирази для  $T_0$ ,  $T_i$  та  $U_0$ ,  $U_i$  на такі:

$$T_0 = \frac{\omega_1 \omega_2^2}{(\omega_1 + \omega_2)^2} q_1 + T_n - \omega (\beta_{11} T_n + \beta_{12} U_n), \quad (4.66)$$

$$T_i = \omega_1 \varphi_i^{(1)} - \omega (D_2^{(1)} (\omega_1 \varphi_i^{(1)})) + \beta_{11} \omega_1 \varphi_i^{(1)} + \beta_{12} \omega_1 \varphi_{i-n_1}^{(1)}; \quad (4.67)$$

$$U_0 = \frac{\omega_1 \omega_2^2}{(\omega_1 + \omega_2)^2} q_2 + U_n - \omega (\beta_{21} U_n + \beta_{22} T_n), \quad (4.68)$$

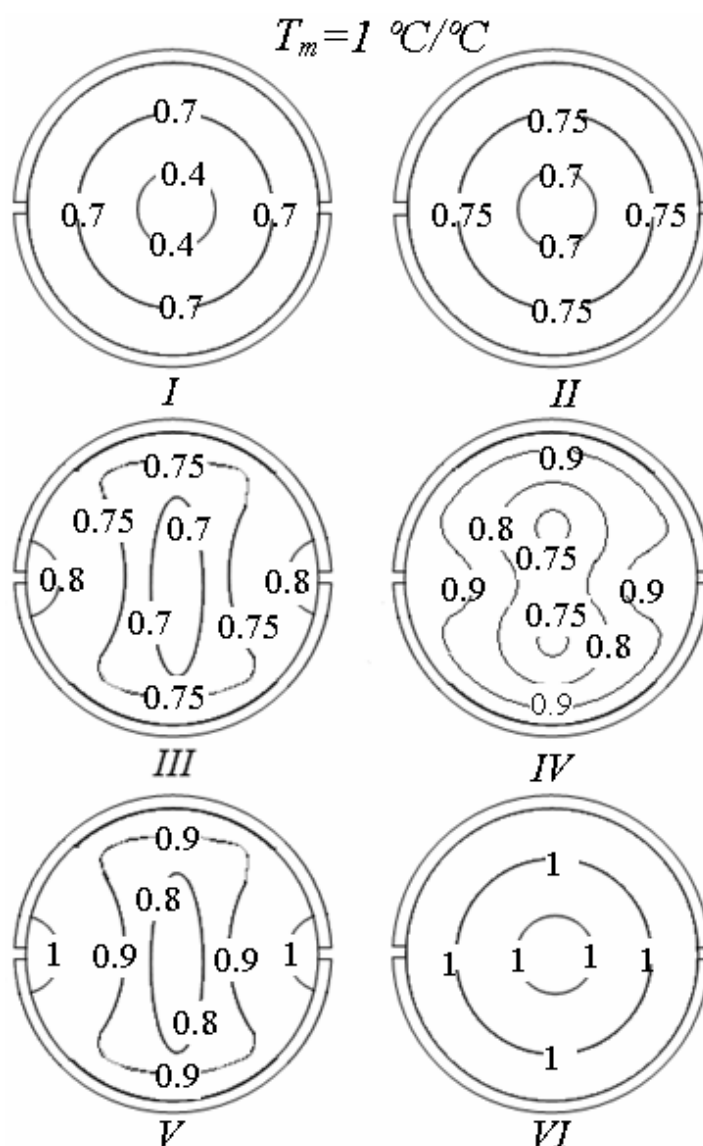
$$U_i = \omega \varphi_{i-n_1}^{(1)} - \omega (D_2^{(1)} (\omega_1 \varphi_{i-n_1}^{(1)})) + \beta_{21} \omega_1 \varphi_{i-n_1}^{(1)} + \beta_{22} \omega_1 \varphi_i^{(1)}. \quad (4.69)$$

Отриманий наближений розв'язок задачі про розподіл температури та вологовмісту у виділеному внутрішньому об'ємі термостата паралелепіпедної форми, що містить три фази, з комбінацією межових умов третього та першого роду використовується для моделювання ІнТМО.

Оскільки ідентифікувати ефект ІнТМО в термостаті можна за кінетикою температури (наявність ділянки кінетики з негативним прирощення температури –  $dT < 0$ ), то скористаємось розробленими алгоритмами для знаходження розподілу температури у внутрішньому виділеному об'ємі термостата циліндричної та паралелепіпедної форми, що містять три фази: газову, рідку, тверду (ККПТ). Обмежимося наведенням в тексті роботи наочних матеріалів.

На рис. 4.3 та 4.4 наведено розподілення полів температур за різних моментів часу під час ІнТМО в термостаті з циліндричною та

паралелепіедною формою внутрішнього виділеного об'єму, отримані з використанням розроблених математичних моделей.



**Рисунок 4.3 – Розподілення полів температур за різних моментів часу у внутрішньому виділеному об'ємі термостата циліндричної форми під час ІнТМО, отримані розв'язком задачі теорії ТМО з використанням методу *R*-функцій сумісно з методом малого параметра: *I, II* – нагрівання; *III, IV, V* – ТМО; *VI* – рівновага**

Розподілення температур наведені для поперечного перерізу виділеного внутрішнього об'єму термостата. Рис. 4.3 *I, II*, 4.4 *I, II* відповідають початку процесу, а саме етапу прогрівання внутрішнього середовища термостата з трьома фазами: газовою, рідкою та твердою

(ККПТ). Внутрішнє середовище термостата прогрівається і починається видалення системної води, причому поширення зони випаровування відбувається від обтюраторів (рис. 4.3 III, 4.3 IV, 4.4 III, 4.4 IV). По мірі випаровування води температура шарів, які досягли свого кінцевого вологовмісту, підвищується (рис. 4.3 V, 4.4 V). Рис. 4.3 VI, 4.4 VI відповідає завершенню процесу зневоднення – встановлюється рівновага за температурою та вологовмістом.

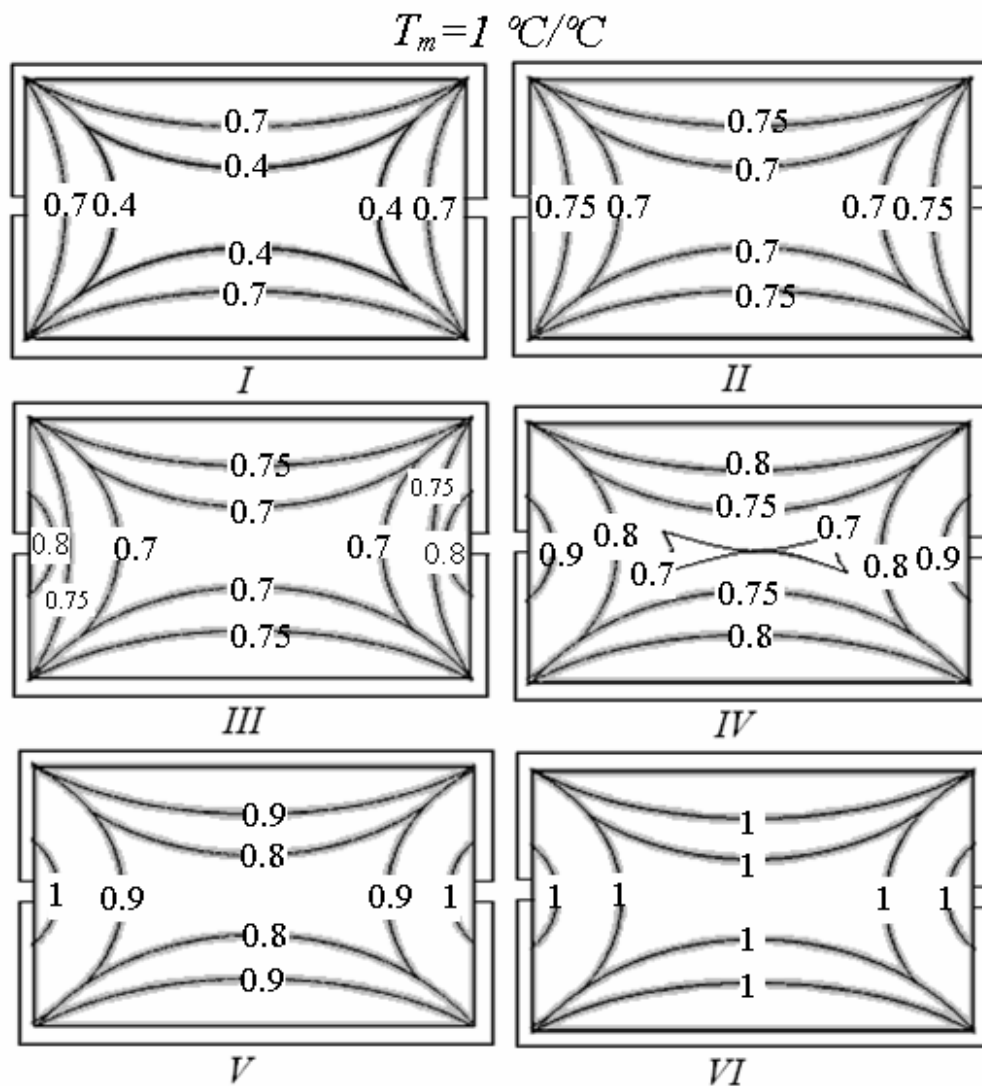


Рисунок 4.4 – Розподілення полів температур за різних моментів часу у внутрішньому виділеному об'ємі термостата паралелепіпедної форми під час ІнТМО, отримані розв'язком задачі теорії ТМО за сумісного використання методу  $R$ -функцій і проекційного методу: I, II – нагрівання; III, IV, V – ТМО; VI – рівновага



З отриманих результатів видно, що температура у внутрішньому виділеному об'ємі термостата, як циліндричної, так і паралелепіпедної форми, не зменшується, тобто  $dT \geq 0$ , що свідчить або про «зрив» ефекту ІнТМО, або про відсутність його «запуску». Таким чином, застосування розроблених моделей, які базуються на класичних диференціальних рівняннях ТМО навіть з використанням методу  $R$ -функцій, без урахування утворення та розвитку дисипативних структур, тобто без урахування «запуску», «протікання» та «закінчення» ефекту ІнТМО, не відбиває реальних розподілень температури в термостаті та їх кінетику під час ІнТМО.

Прийнятні результати можна отримати, якщо для ефекту ІнТМО вирішувати не тепломасообмінну задачу, а теплову. При цьому врахування масообміну здійснювати через функцію, яка описує розсіяння теплової енергії на фазовий перехід води у газовий стан.

Необхідно відмітити, що розв'язки задачі про розподіл температури та вологовмісту у внутрішньому виділеному об'ємі термостата циліндричної та паралелепіпедної форми, що містять три фази, отримані методом  $R$ -функцій сумісно з методом малого параметра та сумісно з методом Бубнова–Гальоркіна, прийнятні для використання при виявленні особливостей механізму і рушійних сил для процесів тепло- та масообміну без енергії активації в тілах циліндричної та паралелепіпедної форми з точним урахуванням їх геометрії. Відзначене має практичну значимість для дослідження процесу зневоднення харчової сировини з частинками циліндричної та паралелепіпедної форми.

## 4.2 Математична модель розвитку потужності дисипативних структур під час індукованого тепломасообміну

### 4.2.1 Постановка задачі зі знаходження функції розподілення потужності дисипативних структур з використанням рівняння теплопровідності

Дисипативні структури, що утворюються під час організації ТМО в ефекті ІнТМО, дозволяють максимально розсіяти «високоякісну» енергію, яка надходить до внутрішнього середовища термостата, що в першому наближенні визначається зниженням його температури. Під час ефекту ІнТМО під утворенням дисипативних структур розуміється розвиток поверхні випаровування за рахунок збільшення пористості ККПТ, яке знаходиться всередині термостата [69].

В роботі [69] було знайдено аналітичний вигляд функції розвинення площі випаровування, а в роботі [271] – знайдено розподілення потужності таких дисипативних структур всередині термостата під час ІнТМО та в залежності від температури теплоносія (Додаток Б.1).

Рівняння теплопровідності для ККПТ всередині термостата, за умови щільного заповнення внутрішньої частини термостата ККПТ та з урахуванням утворення дисипативних структур, буде мати вигляд [272-274]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \Delta T + \frac{1}{c\rho} f_i + \frac{1}{c\rho} f_d, \quad (4.70)$$

де  $T$  – температура ККПТ, °С;

$\tau$  – час, с;

$\lambda$ ,  $c$  і  $\rho$  – коефіцієнт теплопровідності, теплоємність і густина ККПТ,

$$\frac{Вт}{м \cdot ^\circ С}, \frac{Дж}{кг \cdot ^\circ С}, \frac{кг}{м^3};$$

$f_i$  – функція розвитку потужності внутрішніх джерел теплоти у внутрішньому виділеному об'ємі термостата,  $\frac{Дж}{м^3 \cdot с}$ ;

$f_d$  – функція розвитку потужності дисипативних структур,  $\frac{Дж}{м^3 \cdot с}$ .

У даному рівнянні температура, коефіцієнт теплопровідності, теплоємність і густина ККПТ, функції розвитку потужності внутрішніх джерел теплоти та дисипативних структур є функціями координат і часу.

Рівняння (4.70) можна перетворити наступним чином:

$$f_d = c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} - \lambda \Delta T - f_i. \quad (4.71)$$

Вирішуючи рівняння (4.47) відносно шуканої  $f_d$  існує можливість знайти її як функцію координат та часу. Для вирішення даного завдання необхідно знати аналітичний вигляд кінетик температури та вологовмісту ККПТ як функцій координат, часу та температури термостата, а також зміну густини, теплопровідності та теплоємності з часом. Аналітичний вигляд перерахованих функцій отриманий в розділі 3 (формули (3.29) та (3.35)), окрім функцій для густини, теплопровідності та теплоємності.

Функцію розвитку внутрішніх джерел теплоти  $f_i$  у внутрішньому виділеному об'ємі термостата під час ІнТМО будемо вважати рівною нулю, оскільки внутрішні джерела теплоти за умови реалізації ІнТМО розглянутими в роботі способами, тобто за умови забезпечення термостатування внутрішньої частини термостата кондуктивним або конвективним способами – відсутні.

#### 4.2.2 Теплопровідність, теплоємність та густина колоїдного капілярно-пористого тіла всередині термостата як функції температури термостата та координати

Коефіцієнт теплопровідності, теплоємність і густина ККПТ, оскільки вони визначаються його вологовмістом, є функціями часу, координат та температури термостата.

Оскільки інтегрально тіло у внутрішній частині термостата знаходиться в трьох агрегатних станах – твердому, рідкому та газовому, які знаходяться між собою у рівновазі, то його маса буде дорівнювати:

$$m = m_{c.p.} + m_z + m_{c.v.}, \quad (4.72)$$

де  $m_{c.p.}$  – маса сухих речовин ККПТ, кг;

$m_z$  – маса газу (пароповітряної суміші) в порах та між частинками ККПТ всередині термостата, кг;

$m_{c.v.}$  – маса системної води у внутрішній частині термостата, кг.

Маса системної води у внутрішній частині термостата являє собою суму частини системної води  $A_0$ , яка бере участь у ІнтМО, та частини  $(1 - A_0)$ , яка не бере участі в цьому ефекті:

$$m_{c.v.} = A_0 \cdot m_{c.v.} + (1 - A_0) \cdot m_{c.v.} \quad (4.73)$$

Таке розділення води у внутрішній частині термостата на складові необхідне, оскільки у ІнтМО бере участь лише перший доданок –  $A_0 \cdot m_{c.v.}$ , при цьому кожний із доданків має свої середні значення величини теплоємності, густини, теплопровідності. Співвідношення між складовими, їх вміст та фізичні властивості визначаються різними термодинамічними та молекулярно-кінетичними методами. Отримана при цьому інформація надає

можливість практичного керування ефектом ІнТМО, за використання його для технологічної обробки ККПТ. Так, наприклад, для сушінням існує можливість: обирати спосіб видалення води із ККПТ (наприклад, механічний замість сушіння або випарювання) та проводити розрахунки ефективності використання енергії та інших ресурсів для реалізації процесу ТМО у відповідності до обраного способу.

Питома теплоємність ККПТ у внутрішній частині термостата відповідно буде дорівнювати:

$$C = \frac{\delta Q}{m \cdot dT} = \frac{\delta Q_{c.p.} + \delta Q_2 + \delta Q_{c.v.}}{(m_{c.p.} + m_2 + m_{c.v.})dT}, \quad (4.74)$$

де  $\delta Q_{c.p.}$ ,  $\delta Q_2$ ,  $\delta Q_{c.v.}$  – кількість теплоти необхідна для підвищення температури, відповідно, сухих речовин ККПТ, газу в його порах, системної води термостата на 1 К.

Густина ККПТ у внутрішній частині термостата розраховується за формулою:

$$\rho = \frac{m}{V_m} = \frac{\rho_{c.p.}V_{c.p.} + \rho_2V_2 + \rho_{c.v.}V_{c.v.}}{V_m}, \quad (4.75)$$

де  $\rho_{c.p.}$ ,  $\rho_2$ ,  $\rho_{c.v.}$  – густина сухих речовин ККПТ, газу в його порах, системної води в термостаті, які займають, відповідно, об'єми –  $V_{c.p.}$ ,  $V_2$ ,  $V_{c.v.}$ ;

$V_m$  – об'єм внутрішньої частини термостата.

При цьому густину, об'єм та масу сухих речовин ККПТ будемо вважати постійними, а ті ж величини для системної води та газу у внутрішній частині термостата можуть змінюватися впродовж процесу ТМО.

Знайдемо зв'язок між об'ємом і масою газового середовища та рідини у внутрішньому виділеному об'ємі термостата. Маса системної води змінюється наступним чином:

$$m_{c.v.} = m_{c.p.} \cdot w(\tau, x, T_m), \quad (4.76)$$

відповідно, її об'єм:

$$V_{c.v.} = \frac{m_{c.v.}}{\rho_{c.v.}} = \frac{m_{c.p.} \cdot w(\tau, x, T_m)}{\rho_{c.v.}}. \quad (4.77)$$

Очевидно, що об'єм системної води, яка перейшла до газового стану, буде заміщений пароповітряною сумішшю, відповідно об'єм пароповітряної суміші також є функцією вологовмісту і визначається за формулою:

$$V_z = V_m - V_{c.p.} - \frac{m_{c.p.} \cdot w(\tau, x, T_m)}{\rho_{c.v.}}. \quad (4.78)$$

Помноживши об'єм пароповітряної суміші на її густину, отримаємо масу пароповітряної суміші у внутрішньому виділеному об'ємі термостата (масу суцільного газового середовища всередині термостата):

$$m_z = \rho_z \left( V_m - V_{c.p.} - \frac{m_{c.p.} \cdot w(\tau, x, T_m)}{\rho_{c.v.}} \right). \quad (4.79)$$

Як коефіцієнт теплопровідності середовища у внутрішньому виділеному об'ємі термостата [275], за умови щільного його заповнення вологим ККПТ, використовується еквівалентний коефіцієнт теплопровідності внутрішнього середовища термостата  $\lambda_{вн}$ , який характеризує властивість вологого ККПТ проводити теплоту, а, саме,

визначається теплопровідністю сухого скелету ККПТ; теплопровідністю рідини та пароповітряної суміші, що знаходяться в стаціонарному стані в порах матеріалу; конвекцією повітря всередині ККПТ; переносом теплоти за рахунок переносу маси рідини всередині ККПТ; променевою теплопровідністю. Визначення точного значення даної величини досить складне завдання, для вирішення якого в класичних роботах А.С. Гінзбурга [45] та О.В.Ликова [46] існує достатньо велика кількість моделей з низкою різних припущень. Але, оскільки, знаходження точного значення величини  $\lambda_{\text{вн}}$  в роботі не ставилось, то виходячи із результатів досліджень, наведених у роботах [45, 46], вважалось, що теплопровідність вологого ККПТ складається із теплопровідностей сухого скелету ( $\lambda_{\text{с.р.}}$ ) ККПТ, системної води ( $\lambda_{\text{с.в.}}$ ), яку воно утримує, пароповітряної суміші, що оточує частинки ККПТ та знаходиться в його порах ( $\lambda_2$ ).

Інтегральне тіло у внутрішній частині термостата являється складним з розташуванням складових в різних напрямках. На рис. 4.5 показаний один із можливих варіантів розміщення складових, використаний в роботі для розрахунку еквівалентного коефіцієнту теплопровідності середовища у внутрішньому об'ємі термостата, за умови щільного заповнення його вологим ККПТ [45].

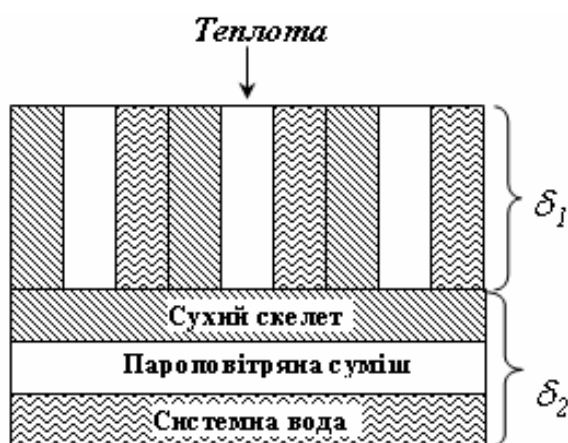


Рисунок 4.5 – Модель розташування складових інтегрального тіла у внутрішньому виділеному об'ємі термостата

Для даної моделі розташування складових інтегрального тіла у внутрішньому об'ємі термостата, еквівалентний коефіцієнт теплопровідності буде розраховуватися за формулою:

$$\lambda_{\text{вн}} = \frac{1}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}}, \quad (4.80)$$

де  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  – еквівалентні коефіцієнти теплопровідності, відповідно, частини внутрішнього середовища термостата, в якому складові розташовані паралельно, та частини, в якому складові розташовані послідовно,  $\frac{Вт}{м \cdot К}$ ;

$\delta_1$  та  $\delta_2$  – значення товщини відповідних частин сировини, м.

Дані коефіцієнти розраховуються за формулами:

$$\lambda_1 = n_{\text{с.р.}} \cdot \lambda_{\text{с.р.}} + n_{\text{с.в.}} \cdot \lambda_{\text{с.в.}} + n_2 \cdot \lambda_2, \quad (4.81)$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{\frac{n_{\text{с.р.}}}{\lambda_{\text{с.р.}}} + \frac{n_{\text{с.в.}}}{\lambda_{\text{с.в.}}} + \frac{n_2}{\lambda_2}}, \quad (4.82)$$

де  $n_{\text{с.р.}}$ ,  $n_{\text{с.в.}}$ , та  $n_2$  – об'ємні частки сухого скелета ККПТ, системної води та газу у внутрішньому виділеному об'ємі термостата, відповідно,  $\frac{м^3}{м^3}$ ;

$\lambda_{\text{с.р.}}$ ,  $\lambda_{\text{с.в.}}$ , та  $\lambda_2$  – коефіцієнти теплопровідності сухого скелета сировини, системної води та газу,  $\frac{Вт}{м \cdot К}$ .

Значення об'ємної частки складових у внутрішньому виділеному об'ємі термостата залежать від обраної сировини, її попередньої обробки, способу укладання в термостаті та визначаються експериментально.

Теплопровідність ККПТ визначається за формулою (4.56), причому необхідно враховувати, що еквівалентний коефіцієнт теплопровідності



внутрішнього середовища термостата змінюється внаслідок ТМО через зменшення кількості рідини та заміщення її газом.

Таким чином, встановлено аналітичний вид всіх функцій, що входять до рівняння (4.47).

#### 4.2.3 Функція розвитку потужності дисипативних структур в колоїдному капілярно-пористому тілі всередині термостата під час індукованого тепломасообміну

Далі після підстановки у рівняння (4.71) виразів (3.29), (3.35), (4.74), (4.75) та (4.80) з урахуванням (4.76, 4.79, 4.81, 4.82) було отримано аналітичний вид функції розвитку потужності дисипативних структур  $f_d(\tau, x, T_m)$  в ККПТ, що знаходиться у внутрішньому виділеному об'ємі термостата, під час ІнТМО.

Функція  $f_d(\tau, x, T_m)$  занадто громіздка для наведення її в тексті, тому в даному пункті наведено графіки функції розвитку потужності дисипативних структур в ККПТ під час ІнТМО в залежності від температури термостата (рис. 4.6) та відстані від стінки термостата, отримані за розрахованим аналітичним виразом даної функції. Для отримання аналогічних графіків розвитку потужності дисипативних структур для будь-якої сировини, необхідно в рівнянні (4.71) використовувати відповідні початковий вологовміст, теплоємність, густину та теплопровідність для неї.

На рис. 4.6 представлені кінетика температури ККПТ [276] та розвиток потужності дисипативних структур на відстані 10 мм від внутрішньої стінки термостата за температури термостата 40, 60 та 90 °С [277].

З наведених кривих видно, що максимум функції розвитку потужності дисипативних структур відповідає мінімуму температури ККПТ. Розвиток потужності дисипативних структур відбувається через збільшення площі випаровування, що сприяє збільшенню інтенсивності випаровування води, в результаті чого зменшується температура ККПТ.

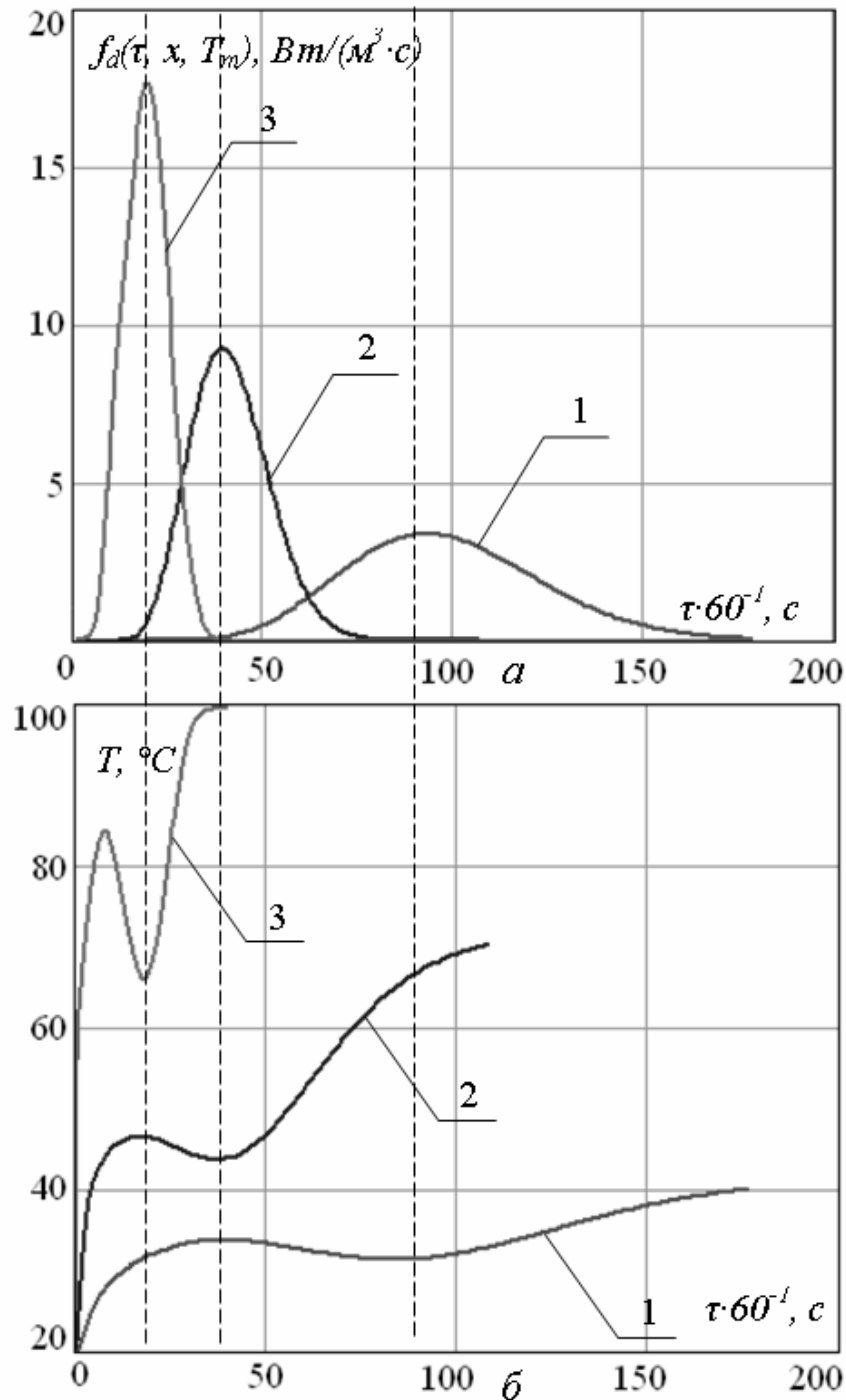
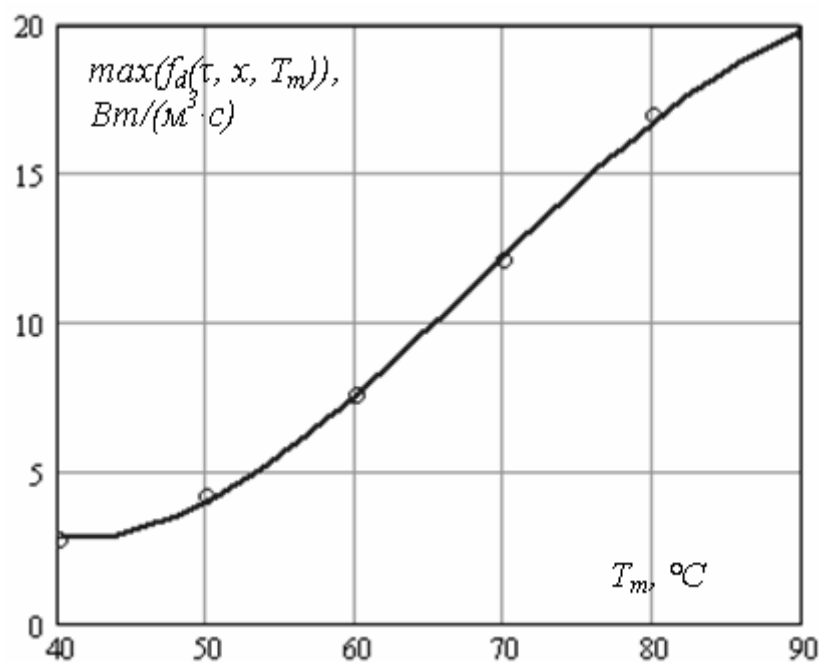


Рисунок 4.6 – Кінетика температури ККПТ (б) та функція розвитку потужності дисипативних структур (а) в ньому на відстані 10 мм ( $x=10$  мм) від внутрішньої стінки термостата за температури термостата,  $^{\circ}C$ : 1 – 40; 2 – 60; 3 – 90

Максимум функції розвитку потужності дисипативних структур відповідає закінченню ефекту ІпТМО через закінчення рідини, для якої можливий фазовий перехід I роду за даних умов.



**Рисунок 4.7 – Максимум функції розвитку потужності дисипативних структур в ККПТ під час ІнТМО від температури термостата**

Необхідно відмітити: за збільшення температури термостата також збільшується максимум функції розвитку потужності дисипативних структур в ККПТ, тобто збільшується максимум функції  $f_d(\tau, x, T_m)$  (рис. 4.7), що відображається на інтенсивності процесу, а, відповідно, і на тривалості ефекту ІнТМО. Так тривалість ефекту ІнТМО за температури термостата  $90^{\circ}\text{C}$  менша за його тривалість за температури  $40^{\circ}\text{C}$  у 3,6 разу.

При цьому залежність максимуму функції розвитку потужності дисипативних структур в ККПТ під час ІнТМО за різної температури термостата має лінійну ділянку в діапазоні температур термостата від  $50^{\circ}\text{C}$  до  $80^{\circ}\text{C}$ . В даному діапазоні однакові прирощення температури термостата призводять до однакових прирощень значення максимуму функції розвитку потужності дисипативних структур. Дана особливість свідчить про те, що зміна температури термостата в даному діапазоні не викликає зміни характеру ефекту ІнТМО.

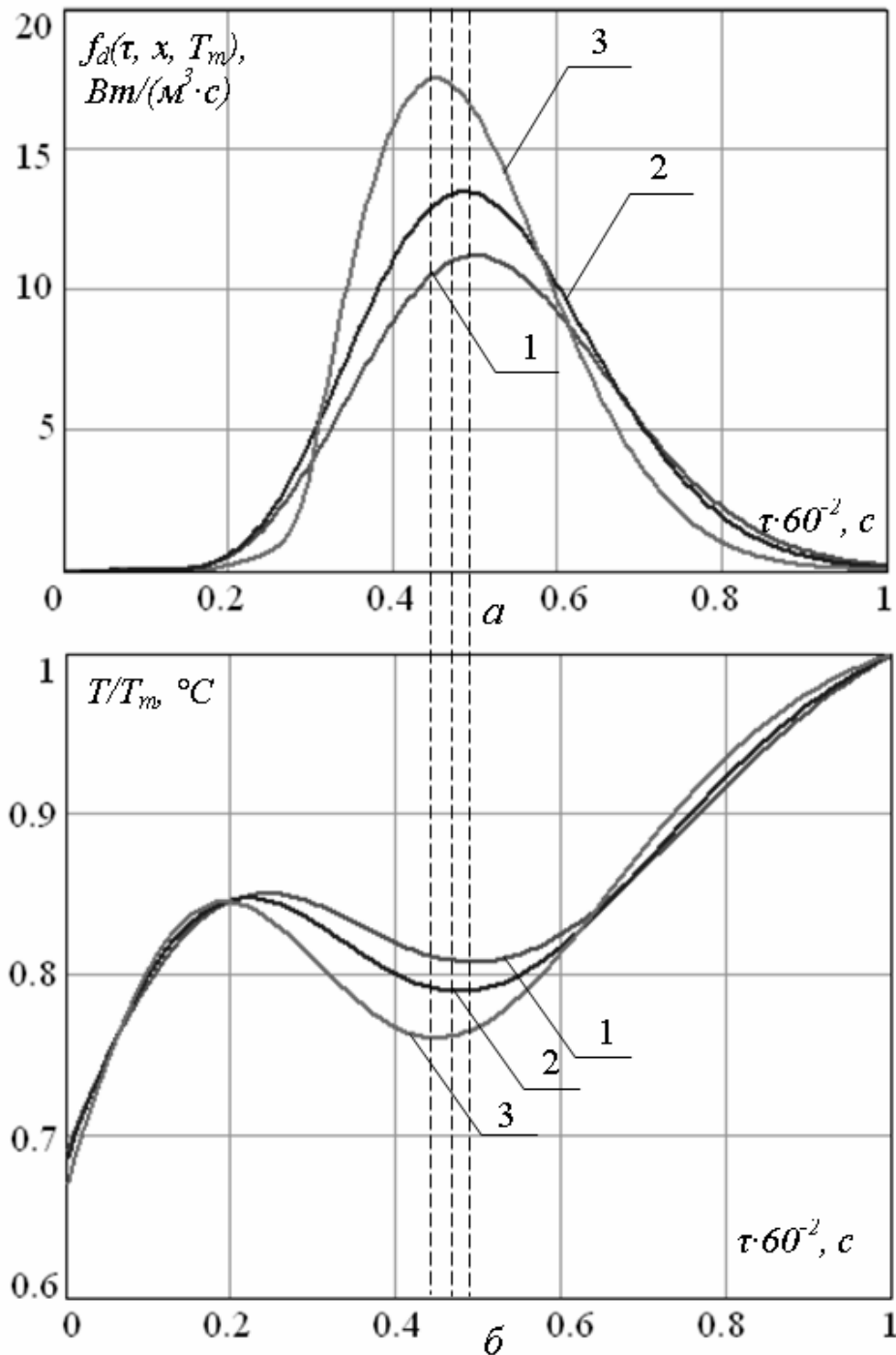
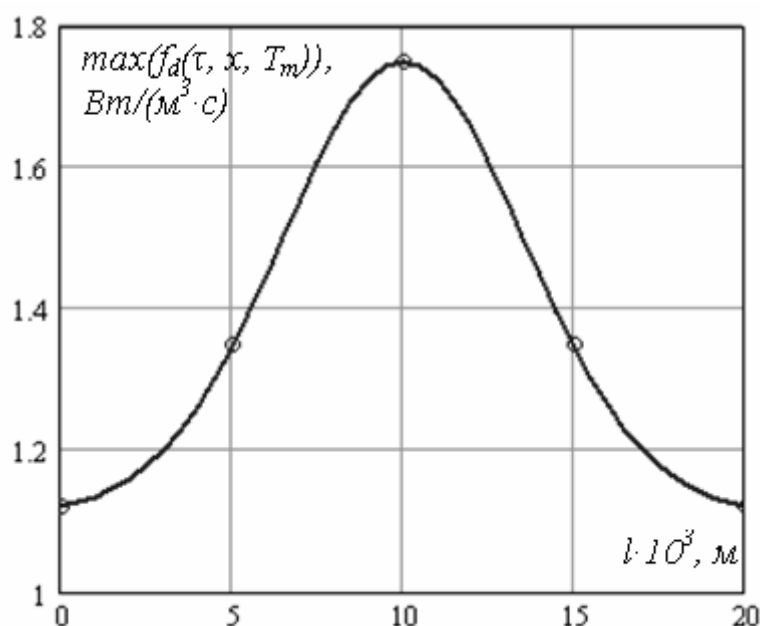


Рисунок 4.8 – Кінетика температури ККПТ ( $\theta$ ) та функція розвитку потужності дисипативних структур в ньому ( $a$ ) за температури термостата  $90^\circ\text{C}$  на різній відстані від внутрішньої стінки термостата, мм: 1 – 0; 2 – 5; 3 – 10

З рис. 4.8, на якому наведено кінетику температури ККПТ та розвиток потужності дисипативних структур на різній відстані від внутрішньої стінки термостата, видно, що інтенсивність випаровування системної води ККПТ тим більша, чим ближче координата до середини внутрішньої частини

термостата, при цьому значення мінімуму температури найменше для координати 10 мм.



**Рисунок 4.9 – Максимум функції розвитку потужності дисипативних структур в ККПТ під час ІнТМО за різної координати у внутрішній частині термостата**

З характеру функції розвитку потужності дисипативних структур витікає: максимум для координати 10 мм має найбільшу величину, знижуючись за наближення до поверхні (рис. 4.9). При цьому дана залежність має нелінійний характер, що свідчить про те, що розвиток поверхні випаровування в різних шарах ККПТ різна, відповідно і ефективність протікання ефекту ІнТМО в них – різна.

Отримані результати корелюють з результатами експериментальних досліджень ефекту ІнТМО (розд. 3). Таким чином, розроблена математична модель для розвитку потужності дисипативних структур в ККПТ є коректною для описання особливостей ефекту ІнТМО.

Практична значимість розробленої математичної моделі полягає у її використанні під час розробки апаратів для обробки сировини з використанням ефекту ІнТМО, модернізації сушарок з використанням

ІнТМО шляхом моделювання процесу зневоднення з варіюванням як параметрами порядку (теплофізичні характеристики сировини), так і керуючими параметрами (товщина внутрішньої частини термостата, температура термостата), а також надає можливість спрогнозувати отримуваний результат базуючись на вихідних даних для сировини та значеннях параметрів, які дозволяють керувати процесом ТМО.

#### Висновки до розділу 4

1. Запропоновано розвиток методу  $R$ -функцій сумісно з методом малого параметра стосовно до розв'язання задач тепло та масообміну. Отримано наближений розв'язок задачі про розподіл температури і вологовмісту в ККПТ при межових умовах третього та першого роду.

2. Запропоновано розвиток методу  $R$ -функцій, який використовується сумісно з проекційним методом Бубнова–Гальоркіна. Отримано наближений розв'язок задачі про розподіл температури та вологовмісту в ККПТ, що знаходиться в термостаті з внутрішнім виділенням об'ємом паралелепіпедної форми за межових умов третього та першого роду.

3. З використанням розроблених математичних моделей побудовано розподілення полів температур за різної тривалості ефекту ІнТМО за умови його використання для зневоднення ККПТ в термостатах з внутрішнім виділенням об'ємом циліндричної та паралелепіпедної форми. Доведено, що застосування розроблених моделей, які базуються на класичних диференціальних рівняннях ТМО без урахування утворення та розвитку дисипативних структур, навіть із застосуванням  $R$ -функцій, не відтворює ефект ІнТМО.

4. Обґрунтовано фізико-математичне моделювання ефекту ІнТМО як вирішення теплової задачі, а не тепломасообмінної. Масообмін враховано через функцію, яка описує розсіювання (дисипацію) теплової енергії на фазовий перехід води у газовий стан. Знайдено аналітичний вид

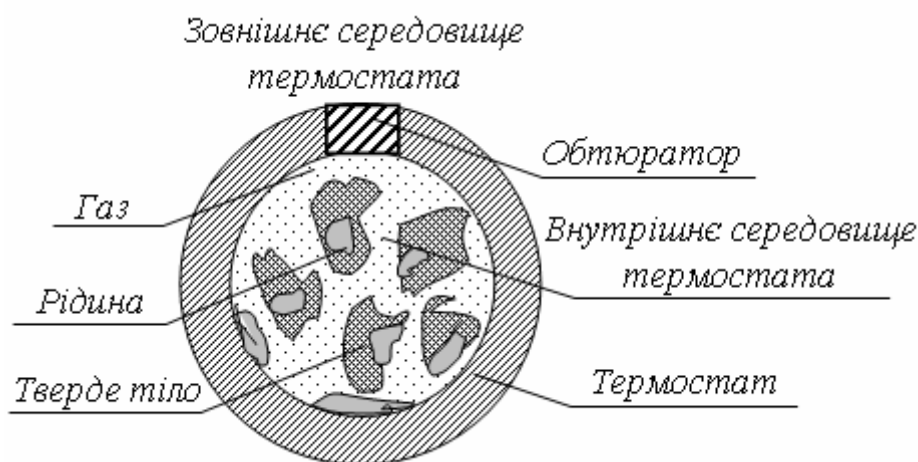
еквівалентного коефіцієнта теплопровідності внутрішнього середовища термостата, його теплоємності та густини як функцій тривалості ефекту ІнтМО, координат та температури термостата. Отримано аналітичний вид функції розвитку потужності дисипативних структур в ККПТ, що знаходиться у внутрішньому виділеному об'ємі термостата, під час ІнтМО.

5. Порівнянням експериментальних результатів та результатів математичного моделювання доведено коректність уведення функції розвитку потужності дисипативних структур для описання ІнтМО та інженерних розрахунків апаратів із варіюванням параметрами порядку та керуючими параметрами ІнтМО.

## РОЗДІЛ 5

### ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ АПАРАТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНДУКОВАНОГО ТЕПЛОМАСООБМІНУ

Дослідження ефекту ІнТМО проведені у попередніх розділах доводять, що можливості його практичного застосування можуть бути достатньо широкими. До теперішнього часу реалізацією ефекту ІнТМО на практиці було його застосування для зневоднення вологої сировини у якості ЗТП-сушіння [69, 70, 138-145]. Як відмічено раніше, ЗТП-сушіння широко досліджене на предмет ТМО у ФЄ за різних способів організації даного процесу. Експериментальні та теоретичні дослідження, а також феноменологічна гіпотеза процесу ТМО наведені в роботі дозволяють узагальнити результати, отримані під час дослідження ЗТП-процесу, та стверджувати: ЗТП-процес є окремим випадком більш загального ефекту – ефекту ІнТМО [150].



**Рисунок 5.1 – Динамічна система для реалізації ефекту ІнТМО**

У відповідності до феноменологічної гіпотези, ефект ІнТМО слід розглядати, як ефект, що відбувається у термостаті, та який полягає у видаленні рідкої фази з внутрішнього виділеного об'єму термостата під час руху системи від нестійкої рівноваги до стійкої. По суті це є розсіювання теплоти термостата за рахунок фазового переходу I роду «рідина – газ» з



одночасним видаленням випаруваної рідини. При цьому під системою розуміється термостат, його внутрішнє середовище та навколишнє середовище оточуюче термостат. Внутрішній виділений об'єм термостата містить рідку й газову фази, може утримувати тверде тіло і сполучається із навколишнім середовищем через обтюратор (рис. 5.1). Під термостатом розуміється пристрій для підтримання постійної температури. У випадку ефекту ІнТМО термостат підтримує постійну температуру внутрішнього середовища.

Основний зміст, який визначає можливості практичного застосування ефекту ІнТМО, полягає в наступному:

1. На етапі термостатування (початок процесу) у відповідності до І початку термодинаміки виконується умова  $TdS > 0$  за рахунок необоротного нагрівання середовища всередині термостата, що свідчить про збільшення числа станів системи, а відповідно і збільшення числа шляхів досягнення нею станів рівноваги.

2. На етапі ефекту ІнТМО виконується умова  $T(dS_e + dS_i) > 0$ . У даній нерівності зовнішня складова прирощення ентропії більша нуля –  $dS_e > 0$  та забезпечується виконанням зовнішньої роботи ( $E_A$ ), а внутрішня складова прирощення ентропії системи  $dS_i$  може бути як менше нуля  $dS_i < 0$ , так і більше –  $dS_i > 0$ . При цьому для інтенсифікації природного ТМО енергія активації процесу менша за баластну –  $E_A < E_B$ , а для індукованого, яким є ІнТМО –  $E_A > E_B$ .

У харчовій промисловості апарати з використанням ефекту ІнТМО можуть бути використані для наступних технологічних операцій:

- сушіння;
- гідротермічної обробки;
- випарювання або згущення;
- ректифікації, перегонки або дистиляції;
- охолодження або термостатування.

## 5.1 Концептуальні рішення технічної реалізації апаратів з використанням індукованого тепломасообміну

Ефективність технічного рішення апаратів з ІнтМО визначається, таким чином, певними конструкторськими рішеннями апарата для розсіювання теплоти термостата. Виходячи із необхідних і достатніх умов організації ефекту ІнтМО, можна виділити вимоги, які повинні виконувати складові динамічної системи для його реалізації [278]. Такими вимогами є (рис. 5.2):

- наявність щонайменше двох рівноважних станів (конструкція внутрішнього об'єму термостата, властивості сировини);
- наявність енергетичного бар'єру  $E_A$  для реалізації переходу між станами рівноваги (конструкція та фільтраційні властивості обтюратора);
- наявність флуктуації на границі розділу між внутрішнім та зовнішнім середовищем (спосіб створення потоку повітря, що рухається відносно зовнішньої поверхні обтюратора, та його параметри);
- забезпечення термостатування (спосіб підведення теплоти до внутрішнього середовища термостата).

Розглянемо перераховані вимоги, способи їх реалізації та можливі технічні рішення.

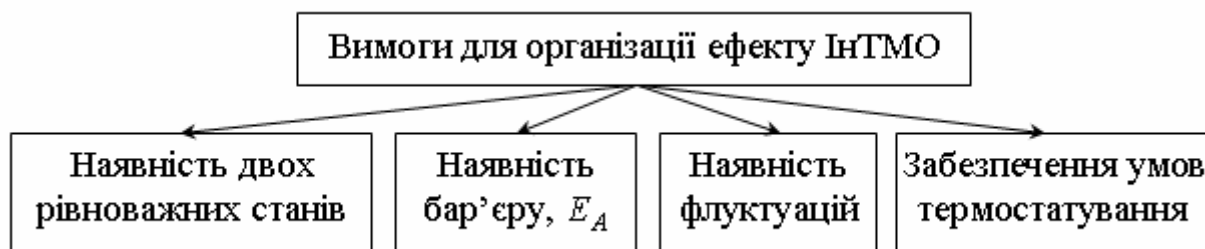


Рисунок 5.2 – Вимоги для організації ефекту ІнтМО

Для реалізації ефекту ІнтМО для динамічної системи необхідне існування щонайменше двох рівноважних станів, причому один із них

повинен бути станом з нестійкою рівновагою, а інший – із стійкою. Наявність стану з нестійкою рівновагою забезпечується наступним чином. Властивості внутрішнього середовища термостата повинні відрізнятися від властивостей зовнішнього так, щоб була відсутня стійка рівновага щонайменше за одним параметром. Для ефекту, що розглядається в роботі, таким параметром є парціальний тиск пари рідини в газових середовищах, відповідно навколишньому та внутрішньому. Забезпечується дана умова наявністю рідкої води у внутрішній частині термостата. При цьому внутрішнє середовище обмежується стінками термостата, виконаними із паронепроникного матеріалу, на поверхні яких виконані обтюратори. Зовнішня площа поверхні обтюраторів принаймні на порядок менша за площу стінок термостата, що обмежують його внутрішній виділений об'єм. Таким чином обтюратори створюють визначений бар'єр для масообміну між внутрішнім середовищем термостата та навколишнім середовищем, що оточує термостат. Тобто внутрішнє середовище знаходиться в «затиснутих» умовах по відношенню до навколишнього. Знаходження внутрішнього середовища термостата в таких «затиснутих» умовах за температури термостата призводить до асимптотичного прагнення парціального тиску пари води у внутрішньому газовому середовищі до значення тиску насиченої пари води за даної температури та тиску. Таким чином, встановлюється рівновага за температурою, але відсутня рівновага за парціальним тиском пари води між внутрішнім та зовнішнім газовим середовищами.

Стіяка рівновага за парціальним тиском пари води між внутрішнім середовищем термостата та навколишнім можлива за відсутності рідкої води у внутрішньому виділеному об'ємі термостата.

Таким чином, для «запуску» ефекту ІнтМО, всередині термостата необхідна наявність рідкої води (як частини системної), кількість якої була б достатньою, за умови її переведення у газовий стан, для наближення парціального тиску пари води до значення тиску насиченої пари за даної температури термостата та тиску.

Забезпечення даної вимоги можливе різними шляхами (рис. 5.3). По-перше, задовольнити вимогу можна за рахунок використання сировини з високим вологовмістом.



**Рисунок 5.3 – Шляхи реалізації вимоги щодо наявності двох рівноважних станів динамічної системи**

По-друге, при використанні сировини з низьким вмістом рідини у внутрішню частину термостата можливе додавання тієї ж рідини, або рідини іншого хімічного складу (наприклад спирту, або олії) для «запуску» ІнТМО та отримання продукції з новими функціонально-технологічними властивостями.

По-третє, для «запуску» ефекту ІнТМО та його реалізації необхідно прагнути до зменшення об'єму газової фази між об'ємами ККПТ у внутрішньому відділеному об'ємі термостата. Забезпечення даного шляху можливе двома способами. Перший спосіб обумовлений відповідними властивостями вихідної сировини, які забезпечуються саме властивостями сировини (кількість сухих речовин, КТ, КПТ, ККПТ) та її попередньою підготовкою (форма частинок сировини; подрібнення сировини до відповідного характерного розміру; спосіб укладання; внесення добавок, які можуть змінювати структуру сировини (наприклад, утворення піни) на КПТ

або ККПТ і т. ін.). Другий спосіб полягає у використанні змінного внутрішнього об'єму термостата. Тобто для даного способу існує можливість, по мірі збільшення відносної частини газового середовища всередині термостата через випаровування рідкої води та/або усадку твердої фази в ньому, механічно зменшувати об'єм внутрішньої частини термостата. Прикладом технічної реалізації другого способу є використання плаваючої або підпружиненої кришки в ФЄ під час ЗТП-сушіння плодово-ягідної сировини зі штучним пороутворенням.

Другою вимогою для організації ефекту ІнтМО в термостаті є наявність енергетичного бар'єру необхідного для переходу від стану нестійкої рівноваги до стану стійкої рівноваги (рис. 5.4). Енергетичний бар'єр  $E_A$  створюється шляхом створення у стінках термостата обтюраторів. Обтюратори характеризуються ефективним коефіцієнтом фільтрації потоку газу  $k_{\phi,ef}$ . (2.1). Функції обтюлятора полягають в тому, що він створює визначений опір, як потоку повітря, що рухається відносно зовнішньої поверхні обтюлятора, та його флуктуаціям, так і внутрішньому середовищу. Фільтраційні властивості обтюлятора повинні бути такими, щоб повний тиск навколишнього газового середовища урівноважувався повним тиском внутрішнього газового середовища, причому границя розділу між даними середовищами повинна знаходитись в об'ємі обтюлятора. Ефективний коефіцієнт фільтрації обтюлятора при цьому визначається властивостями матеріалу, із якого він виконаний (коефіцієнтом фільтрації матеріалу  $k_\phi$ ), його площею поперечного перерізу  $S$  та товщиною  $l$ :

$$k_{\phi,ef} = \frac{k_\phi \cdot l}{S}, \quad (5.1)$$

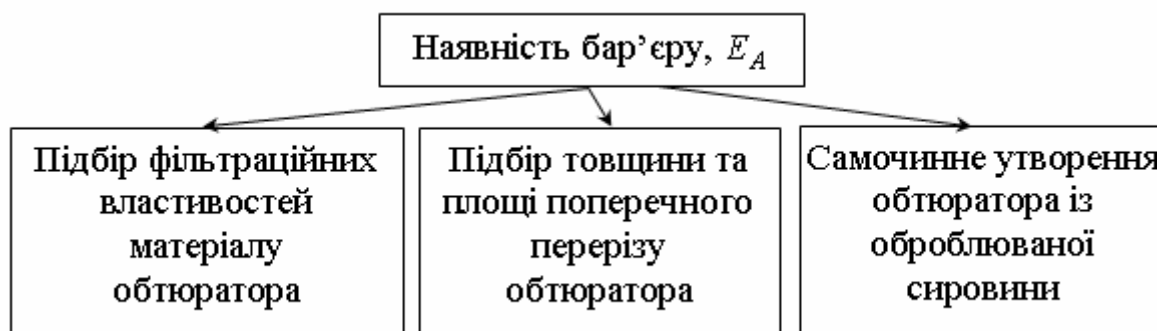
де  $k_\phi$  – коефіцієнт фільтрації матеріалу обтюратора, який дорівнює швидкості фільтрації газу  $v_\phi$  через одиницю площі матеріалу при градієнті напору газу  $\frac{dH}{dl}$ , який дорівнює одиниці:

$$k_\phi = \frac{v_\phi}{\left(\frac{dH}{dl}\right)}, \quad (5.2)$$

де  $dH$  – різниця напорів, завдяки якій відбувається фільтрація, м;

$dl$  – довжина шляху фільтрації, м.

Виходячи із наведених виразів (5.1)–(5.2) необхідні вимоги до обтюратора можуть бути досягнуті або підбором відповідного капілярно пористого матеріалу, який заповнює зазор або отвір у стінці термостата та який обумовлює його фільтраційні властивості, або підбором його товщини та площі поперечного перерізу зазору у внутрішній стінці термостата, у якій розміщений капілярно-пористий матеріал.



**Рисунок 5.4 – Шляхи створення енергетичного бар'єру для «запуску» ефекту ІнТМО**

Окремим способом створення обтюратора на практиці є його самочинне утворення із сировини, яка підлягає технологічній обробці з використанням ефекту ІнТМО. Так під час ЗТП-сушіння, окремого випадку ефекту ІнТМО, обтюратор виконується із сировини, яка підлягає сушінню. Вологою сировиною при підготовці до ЗТП-сушіння заповнюють ФЄ таким

чином, щоб вона щільно прилягала до стінок та зазорів ФЄ. На початку процесу першою висихає частина сировина, що знаходиться біля зазору, створюючи таким чином обтюратор термостата. Перевагою такого способу є відсутність додаткових пристроїв (відсутність обтюлятора із штучних матеріалів), спрощена конструкція внутрішньої частини термостата та простота санітарної обробки. Недоліком є те, що такий спосіб прийнятний за умови обробки сировини однорідного складу з розмірами частинок значно меншими за характерні розміри внутрішнього виділеного об'єму термостата. При цьому об'єм сировини не повинен зменшуватись під час ІнтМО більше ніж на 10...15%, у разі більшої усадки, сировина відділяється від зазору і перестає виконувати функції обтюлятора – ефект ІнтМО «зривається». Необхідно відмітити, що на даному етапі розвитку теорії та техніки ефекту ІнтМО фільтраційні властивості обтюраторів, які утворюються під час процесу масообміну із сировини, досліджені недостатньо, і на практиці вони застосовуються виходячи із напрацьованого досвіду.

Виходячи із експериментальних та теоретичних розрахунків ефективний коефіцієнт фільтрації обтюлятора необхідний для реалізації ефекту ІнтМО обирається із діапазону від  $2 \cdot 10^{-2}$  до  $3 \cdot 10^{-2}$  м/с. Як відмічено вище, досягнути необхідного значення коефіцієнта фільтрації можливо варіаціями розміру капілярно-пористого матеріалу та його властивостями. В роботі як КПТ для штучного створення обтюлятора використовувались синтетична та вовняна повсть, фільтрувальна сітка із латуні та із нержавіючої сталі.

Наступною вимогою необхідною для «запуску» ефекту ІнтМО є наявність флуктуації на границі розділу між внутрішнім та навколишнім середовищем. Границя розділу між внутрішнім та навколишнім середовищами термостата знаходиться в об'ємі обтюлятора. При цьому в об'ємі обтюлятора відбувається флуктуація концентрації молекул води внутрішнього газового середовища.

Флуктуації концентрації молекул води внутрішнього газового середовища створюються механічними збуреннями, які можна реалізувати зовнішнім або внутрішнім газовим середовищем термостата (рис. 5.5).

Перший із способів створення флуктуації може бути організований шляхом обдування зовнішньої по відношенню до внутрішньої частини термостата поверхні обтюратора. Обдування зовнішньої поверхні обтюратора потоком повітря проводиться зі швидкістю, за якої режим плинину повітря відповідає турбулентному режиму плинину. В результаті утворення турбулентних збурень біля поверхні, що омивається потоком повітря, в потоці виникають пульсації швидкості повітря, перпендикулярні до його напрямку. Такі пульсації, які мають стохастичний характер, і створюють флуктуації параметрів газового середовища термостата в об'ємі обтюратора під час ІнтМО.



**Рисунок 5.5 – Шляхи створення флуктуації в об'ємі обтюратора на границі розділу між внутрішнім та зовнішнім середовищем термостата**

Іншим способом створення флуктуацій концентрації молекул води внутрішнього газового середовища в об'ємі обтюратора є збудження механічних коливань в даному середовищі. Збудження коливань можливе шляхом генерації звукових коливань відповідної частоти у суцільному газовому середовищі всередині термостата відповідними пристроями (інфразвуковими, ультразвуковими, звуковими генераторами тощо).



Однак необхідно відмітити, що наявність потоку повітря відносно зовнішньої поверхні обтюратора необхідна як за першого способу організації флуктуації концентрації, так і за другого. Потік повітря, по-перше може створювати за необхідності флуктуацію в обтюраторі. По-друге, він зменшує дифузійний шар, який утворюється молекулами води у газовому стані через масообмін між навколишнім середовищем та внутрішнім середовищем термостата та який зменшує градієнт концентрації молекул води  $\left( \frac{\partial \langle n_{ind} \rangle}{\partial x_{ind}} \right)$  (формула (2.24)) в об'ємі обтюратора. Зменшенню градієнту концентрації молекул води в обтюраторі сприяє зменшення величини індукованого потоку маси. Таким чином, з точки зору ефективності ІнТМО, організація руху повітря відносно зовнішньої поверхні обтюратора є необхідною як за першого способу створення флуктуації, так і за другого.

Останньою необхідною вимогою для організації ефекту ІнТМО є забезпечення термостатування. При цьому термостатування повинно забезпечуватись таким чином, щоб кількість теплоти, розсіяної за рахунок переходу рідкої води у газовий стан всередині термостата та за рахунок винесення частинок внутрішнього середовища через обтюратор в навколишнє середовище, була значно меншою за теплоту, яку утримує термостат.

Забезпечити термостатування можна будь-яким способом: конвективним, радіаційним, кондуктивним (рис. 5.6). Можливе комбінування способів підведення теплоти.

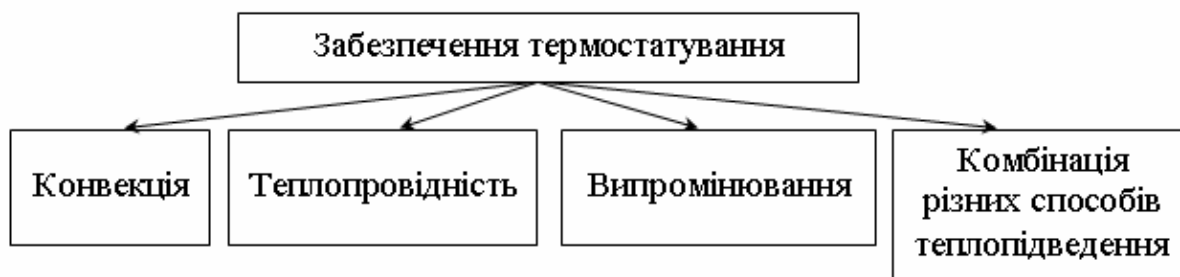


Рисунок 5.6 – Шляхи забезпечення термостатування під час ефекту ІнТМО

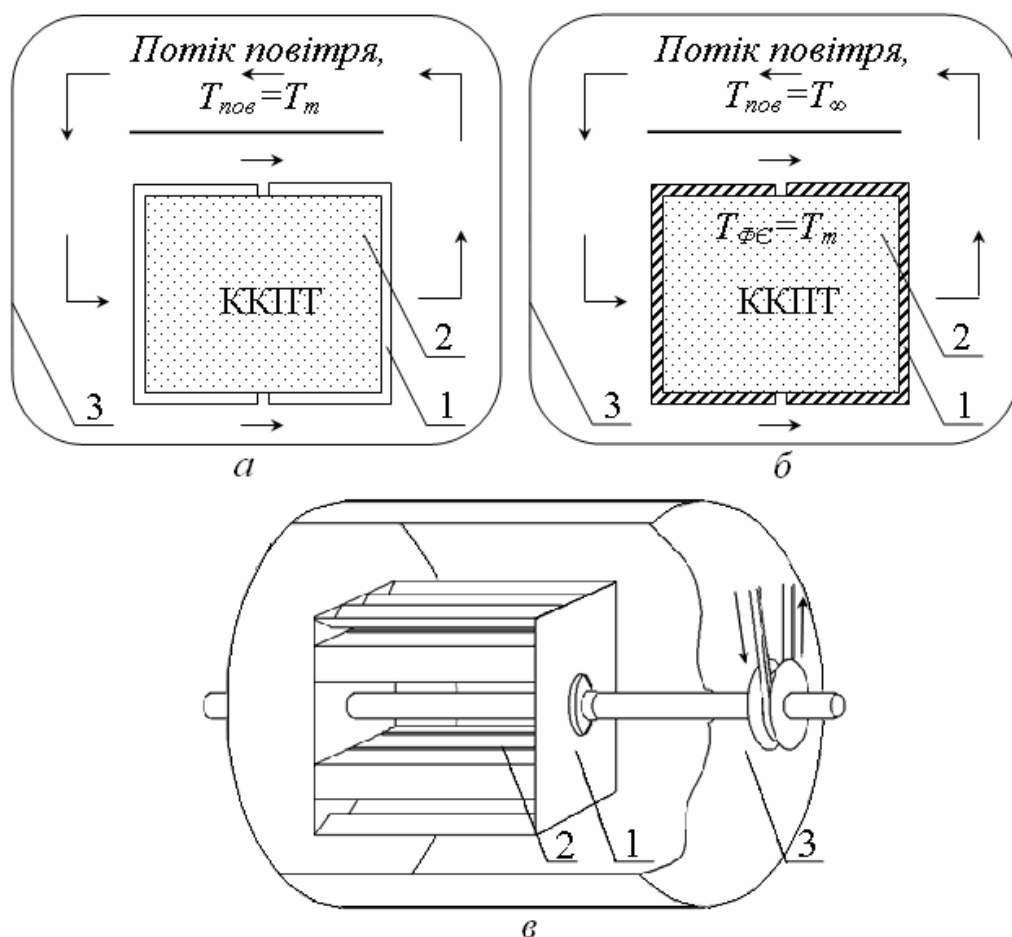
Необхідно відмітити, що одна і та ж складова динамічної системи, в якій реалізується ефект ІнТМО, може забезпечувати дві або декілька необхідних умов його організації. Так під час ЗТП-сушіння як термостат слід розглядати сушильну камеру, в якій розміщена ФЄ з вологою сировиною. Флуктуація концентрації молекул води внутрішнього середовища ФЄ створюється потоком підігрітого повітря, який рухається відносно зовнішньої поверхні обтюраторів. Термостатування внутрішнього середовища термостата забезпечується змішаним способом: підігріте повітря конвективно передає теплоту стінкам, які кодуктивно підводять її до внутрішнього середовища. При цьому потік повітря підігрітого до визначеної температури забезпечує дві умови – створює флуктуації в обтюраторі та забезпечує термостатування внутрішнього середовища.

Таким чином, виходячи із описаних необхідних вимог для реалізації ефекту ІнТМО, їх технічну реалізацію слід обирати у відповідності до мети, яку покладено в основу технологічної обробки сировини, вимог до якості отримуваної продукції та енергоефективності використовуваних процесів та обладнання.

Виходячи із вимог до елементів конструкції апаратів з ІнТМО, сформулюємо концептуальні рішення їх практичної реалізації для виконання низки технологічних операцій, які застосовуються у харчовій промисловості.

1. Сушіння вологого ККПТ. Застосування ефекту ІнТМО для сушіння харчової сировини рослинного та тваринного походження представлено способом сушіння змішаним теплопідводом (ЗТП-сушіння). В даній технічній реалізації ефекту ІнТМО, як відмічено вище, термостатом слід вважати сушильну камеру (3). ФЄ (1) при цьому є ТМО-модулем, який обмежує внутрішній виділений об'єм термостата, в якому знаходиться вологе ККПТ (2). Термостатування та масовідведення забезпечується потоком повітря, що омиває ФЄ з визначеною швидкістю, та має температуру, яка дорівнює температурі термостата. Функції обтюратора виконує сировина, яка

знаходиться всередині ФЄ та щільно прилягає до зазорів на її поверхні (рис. 5.7 *a*). При цьому виходячи із можливих концептуальних рішень організації ефекту ІнТМО існують варіації технічної реалізації апаратів для зневоднення з його використанням.



**Рисунок 5.7 – Схеми вузлів апаратів для сушіння з ІнТМО: *a* – із конвективним теплопідведенням; *б* – із кондуктивним теплопідведенням; *в* – із ФЄ, що рухається відносно повітря; 1 – ФЄ; 2 – ККПТ; 3 – сушильна камера**

Так підведення теплоти до внутрішнього виділеного об'єму термостата можна організувати, наприклад, кондуктивним або радіаційним способом, а обдування обтюраторів проводити повітрям сушильної камери (3) з температурою виробничого приміщення ( $10...25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) –  $T_{нов}=T_{\infty}$  (рис. 5.7 *b*). Температура стінок (1), які обмежують внутрішній виділений об'єм термостата ( $T_{\Phi\epsilon}$ ), в якому знаходиться вологе ККПТ (2), дорівнює

температурі термостата ( $T_m$ ). При цьому, як доведено в підрозділі «3.3.8 Вплив швидкості потоку повітря, що рухається відносно обтюратора термостата, на характер ІнТМО», значимий вплив підігріву потоку повітря, що омиває зовнішню поверхню обтюратора, на ефект ІнТМО не спостерігається, оскільки основна функція повітря – створювати флуктуації параметрів газового середовища в об'ємі обтюратора.

Інша технічна реалізація базується на відносності руху: можна рухати сам термостат з обтюратором у газовому середовищі, яке знаходиться у стані спокою (рис. 5.7 *с*) [279]. Так обертаючи на валу з приводом ТМО-модуль (1) з турбулізаторами, який обмежує внутрішній виділений об'єм термостата, відносно повітря, що знаходиться у стані спокою, існує можливість організації ефекту ІнТМО для сушіння вологого ККПТ всередині ТМО-модуля. При цьому підведення теплоти до внутрішнього середовища може бути забезпечене конвективним способом від повітря, яке знаходиться всередині сушильної камери (3), або радіаційним способом (НВЧ, ІЧ, тощо).

2. Гідротермічна обробка вологого ККПТ. Дана операція реалізовується шляхом «блокування» ефекту ІнТМО (створення умов не достатніх для його «запуску») для обробки сировини у середовищі з парціальним тиском пари води близьким до тиску насиченої пари за визначеної температури (наприклад, для проварювання сировини) та наступним «запуском» ефекту ІнТМО для зневоднення обробленої парою сировини.

Організувати гідротермічну обробку можна декількома способами. За одним із способів закривають обтюратори для гідротермічної обробки сировини та відкривають їх для подальшого сушіння (рис. 5.8 *а*).

Іншим способом є організація умов, за яких будуть відсутні флуктуації параметрів газового середовища в об'ємі обтюратора, а «запуск» ефекту ІнТМО буде заблокований для реалізації гідротермічної обробки, та забезпечення умов «запуску» ефекту ІнТМО для сушіння обробленої сировини (рис. 5.8 *б*). Даний спосіб може бути організований, якщо буде відсутній рух потоку повітря відносно обтюраторів на поверхні стінок, що

обмежують внутрішню частину термостата. При цьому підведення теплоти до внутрішнього виділеного об'єму термостата (ТМО-модуля) організовується кондуктивним або радіаційним способом.

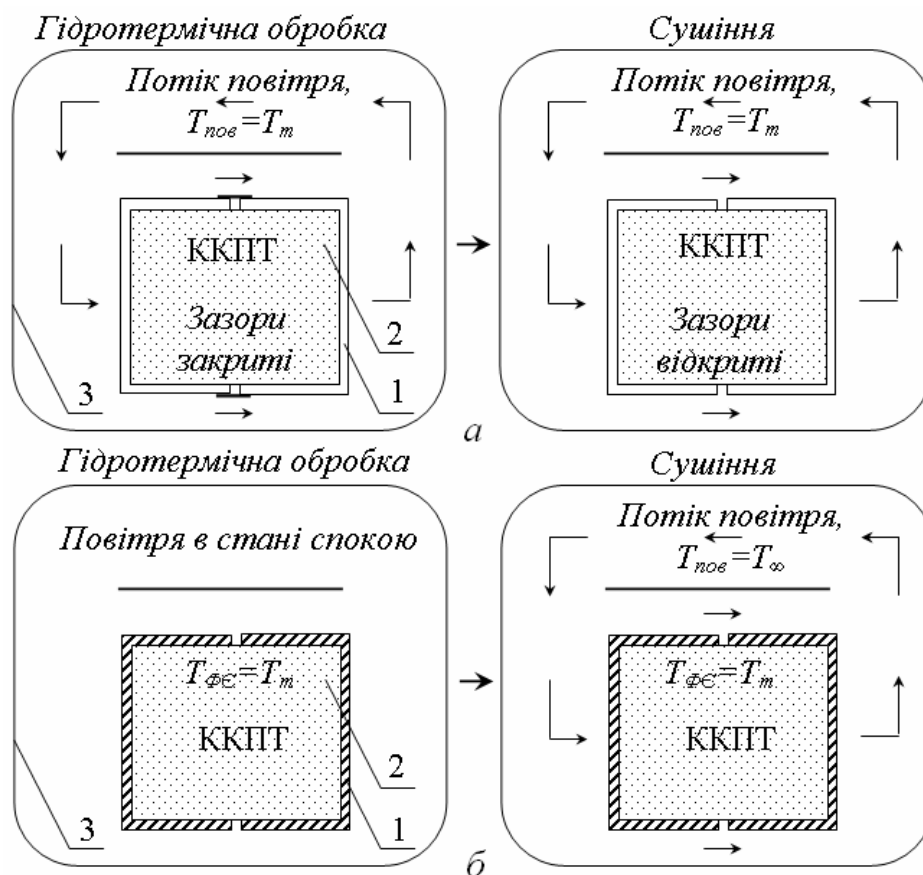
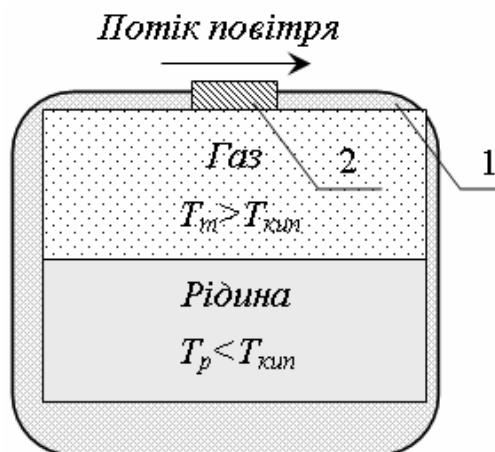


Рисунок 5.8 – Схеми апаратів для гідротермічної обробки ККПТ із використанням ефекту ІнтМО: а – способом із закриттям зазорів; б – способом із зупинкою потоку повітря; 1 – теплообмінний модуль; 2 – ККПТ; 3 – робоча камера

3. Випарювання або згущення сировини з високим вмістом системної води (суспензії, розчини, тощо). Проводяться дані операції у термостаті, внутрішнє середовище якого являє закритою ємність із обтюратором (рис. 5.9).

При цьому обтюратор необхідно створити штучно, оскільки самочинне утворення обтюратора із такої сировини не можливе. Температуру термостата, як слідує із досліджень проведених у підрозділі «3.3.1 Дослідження характеру ефекту ІнтМО за температури термостата більшої за температуру кипіння рідини», можна обирати більшою за

температуру кипіння рідини, яку містить сировина, без ризику закипання або підгоряння сировини. Обмеження значень максимальної температури необхідно накладати лише виходячи із термолабільності нутрієнтів сировини.



**Рисунок 5.9** – Схема апарата для випарювання, концентрування або згущення сировини з високим вмістом системної води з використанням ефекту ІнТМО: 1 – термостат; 2 – обтюратор

5. Охолодження та термостатування. Охолодження реалізується завдяки наявності високих градієнтів температури в ККПТ у внутрішньому виділеному об'ємі термостата під час ефекту ІнТМО. Так різниця температур між шарами волого ККПТ всередині термостата під час ІнТМО на відстані 5...10 мм може досягати 50...60% від температури термостата (за температури термостата менше 100 °С).

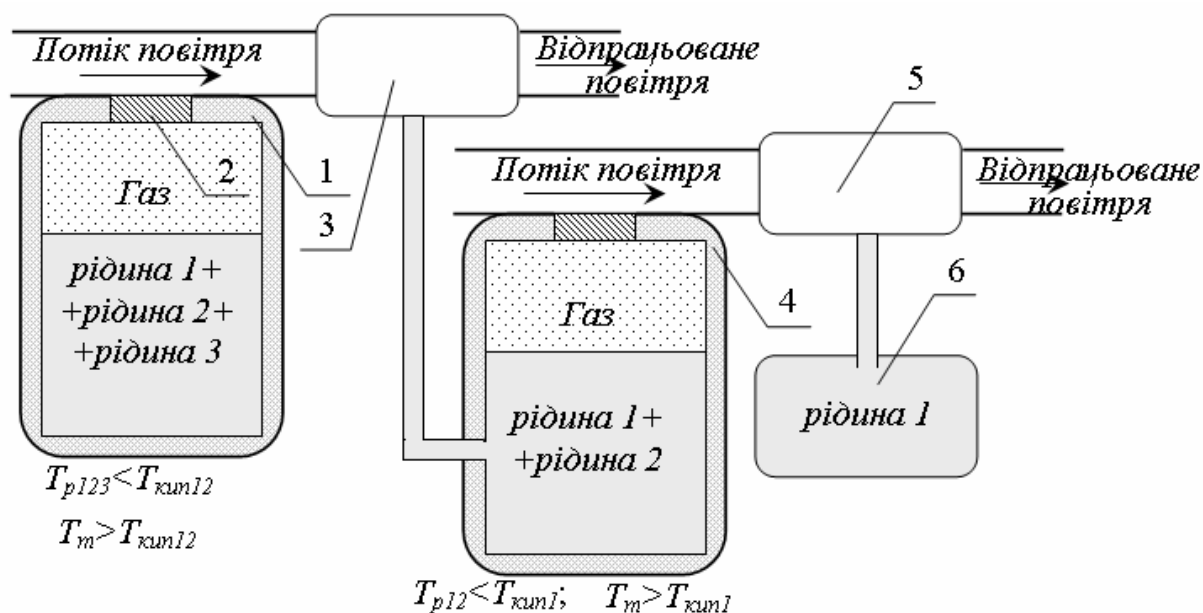
Термостатування реалізується завдяки такій особливості ефекту ІнТМО, як сталість температури рідини за умови наявності визначеної її кількості у внутрішньому виділеному об'ємі термостата (рис. 5.10). При цьому процес кипіння рідини відсутній навіть за температури термостата більшої за температуру кипіння даної рідини.



**Рисунок 5.10 – Схема апарата для охолодження та термостатування з використанням ефекту ІнтМО: 1 – термостат; 2 – обтюратор; 3 – ємність для сировини, яка підлягає охолодженню або термостатуванню**

5. Ректифікація, перегонка або дистиляція (розчини, суспензії, тощо). Дані операції є операціями з розділення рідин з різними теплофізичними властивостями, а саме різними температурами кипіння та/або питомими теплоємностями та/або питомими теплотами пароутворення.

Їх реалізація з використанням ефекту ІнтМО організовується в термостатах, внутрішнє середовище яких являє закриту ємність із штучно створеним обтюратором (рис. 5.11). На рисунку наведено приклад розділення суміші трьох рідин з різною температурою кипіння з використанням ефекту ІнтМО в термостаті. Будемо вважати, що температури рідин ступенево зростають –  $T_{кин1} < T_{кин2} < T_{кин3}$ . У першому термостаті (1) проводиться відділення рідини 1 та рідини 2 від рідини 3. Потік повітря, який виносить пару рідини 1 та 2 із термостата 1, надходить до конденсатора 3, де пара рідин 1 та 2 конденсується та надходить до другого термостата (4). В другому термостаті проводиться відділення рідини 1 від рідини 2. Пара рідини 1 конденсується у конденсаторі 5 та надходить до збірника 6. Кількість рідин, які підлягають розділенню, визначає необхідну кількість ступенів «термостат – конденсатор».



**Рисунок 5.11** – Схема апарата для ректифікації, перегонки або дистиляції з використанням ефекту ІТМО: 1, 4 – термостати; 2 – обтюратор; 3, 5 – конденсатори; 6 – збірник для рідини

Необхідно відмітити, що наведені рішення апаратів з використанням ІТМО є універсальними. Їх універсальність полягає в можливості використання одного апарата для виконання будь-якої із описаних технологічних операцій за мінімальних конструкційних змін у наявному апараті.

## 5.2 Розробка обладнання для виробництва швидковідновлюваних каш з використанням ефекту індукованого тепломасообміну

Прикладом технічної реалізації апарата з використанням ІТМО на основі концептуальних рішень, наведених у попередньому підрозділі, є розробка обладнання для виробництва швидковідновлюваних каш, де застосовується даний ефект.

Швидковідновлювані каші являють собою напівфабрикати високого ступеня готовності, що не потребують варіння. Ключовими операціями технологічної схеми виробництва швидковідновлюваних каш є операція з



проварювання крупи до напівготовності та операція з сушіння отриманого напівфабриката до гігроскопічного вологовмісту.

Виходячи із теорії ефекту ІнтМО та концептуальних рішень апаратів з його використанням пропонується його застосування для гідротермічної обробки круп, де кінцевою продукцією є швидковідновлювані каші [280]. При цьому вимогами, які висуваються до апарата, є його універсальність та безперервність роботи.

### 5.2.1 Принципова технологічна схема виробництва швидковідновлюваних каш з використанням ефекту індукованого тепломасообміну

Принципова технологічна схема виробництва швидковідновлюваних каш із використанням ефекту ІнтМО, побудована на основі технологічної схеми виробництва варено-сушених круп [281-283] і бобових та наведена на рис. 5.12.

Відрізняється розроблена схема відсутністю операції варіння гострою парою, плющення провареної сировини та операції досушування. Натомість в схемі присутня операція замочування. Проварювання та сушіння сировини проводиться у термостаті. Процес гідротермічної обробки із застосуванням ефекту ІнтМО являється безперервним.

Гідротермічна обробка круп із використанням ефекту ІнтМО включає наступні операції: очищення від домішок, мийку, замочування, проварювання та сушіння у термостаті, вивантаження сушеної продукції.

Очищення від домішок проводиться на зерновому сепараторі, оснащеному магнітними скобами для видалення металодомішок і набором сит різних розмірів залежно від виду сировини, що переробляється. Легкі домішки відокремлюють дворазовою продувкою повітрям під час надходження зерна в сепаратор і під час виходу з нього. На сепараторі залежно від виду крупи, що переробляється, установлюють штамповані сита із круглими або довгастими отворами. Приймальне, сортувальне й сходове

сита під час роботи сепаратора виконують зворотно-поступальні рухи. На приймальному ситі видаляються великі грубі домішки (солома, камені, тріска й т.п.), на сортувальному – зернові й інші домішки, розмір яких крупніше зерна. Проходом через сходове сито – домішки розміром дрібніше зерна.

Для остаточного очищення від забруднень крупу миють на крупомийній машині, де видаляють з її поверхні бруд, мучель, пил, відокремлюють насіння дикоростучих рослин, лузгу, органічне сміття. Використовують звичайну питну (водопровідну) воду. Якість сировини після мийки значно підвищується. Крупа повністю звільняється від мінерального забруднення; її якість підвищується. Значно знижується вміст бур'янистої домішки, мучелі.

Далі крупу замочують у відкритих ємностях. Наявність операції замочування обумовлена двома необхідними вимогами. Перша витікає із завдання, що ставиться під час технологічної обробки – проварювання сировини до напівготовності. Для даної операції необхідна визначена кількість води у відповідності до використовуваної сировини.

Друга необхідна вимога обумовлена необхідною умовою для реалізації ефекту ІнТМО, яка полягає у необхідності наявності двох рівноважних станів системи у термостаті. За ДСТУ вологість круп знаходиться в діапазоні від 12 до 17% (вологівміст відповідно знаходиться в діапазоні від 14 до 20 *кг/кг сух. реч.*), тобто в гігроскопічному стані, а для «запуску» ефекту ІнТМО, всередині термостата необхідна наявність рідкої води. При цьому кількість системної води повинна бути достатньою для наближення парціального тиску пари води в термостаті до значення тиску насиченої пари за даної температури термостата, за умови її переведення у газовий стан. Забезпечення відмічених необхідних вимог можливе шляхом додавання води у внутрішній виділений об'єм термостата, а для даного випадку – шляхом замочування сировини перед гідротермічною обробкою.

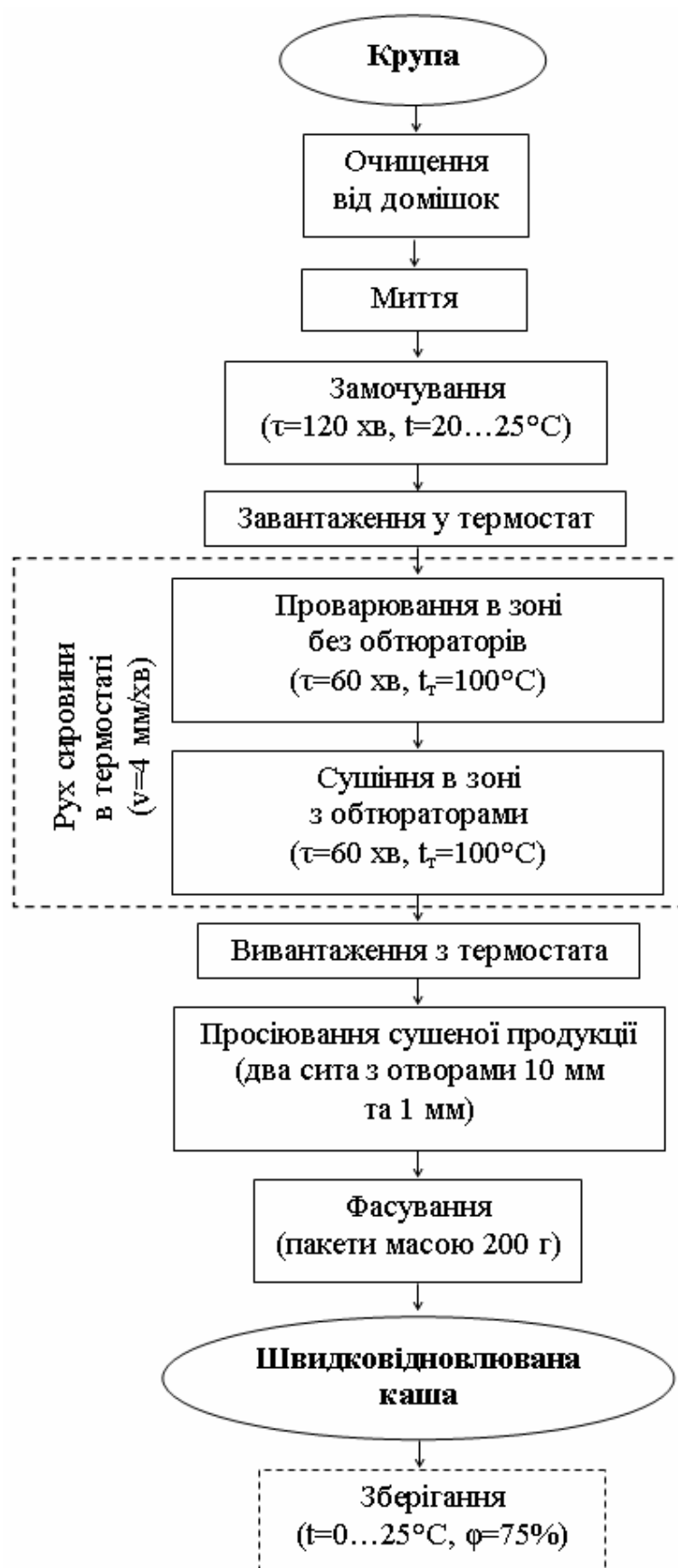


Рисунок 5.12 – Принципова технологічна схема виробництва швидковідновлюваних каш із використанням ефекту ІнТМО

В якості змочуючої рідини використовують питну воду за температури води 20...25 °С. Раціональна тривалість замочування визначається сировиною. Після замочування крупа надходить на вібраційне сито, де звільняється від поверхневої вологи.

Зволожену таким чином сировину засипають у завантажувальний бункер термостата. У термостаті проводиться проварювання сировини до напівготовності та висушування до гігроскопічного вологовмісту.

В процесі проварювання та сушіння деякі види круп можуть грудкуватись. Щоб звільнити одержуваний продукт від грудок, які знижують якість сушеної харчової продукції, його піддають просіванню. В якості просіювача використовують вібраційний пристрій, оснащений двома ситами: на верхньому ситі відбирають грудочки круп, які потім дроблять і повертають на повторний просів. З нижнього сита сходять швидковідновлювана каша, звільнена від мучелі.

Отримані швидковідновлювані каші направляють у бункер рецептурно-змішувального відділення або фасують у полімерну упаковку.

Таким чином, технологічна схема гідротермічної обробки круп спрощена за рахунок уникнення операцій проварювання, плющення та досушування, що досягається шляхом об'єднання процесів проварювання та сушіння в одному апараті безперервної дії, що працює з використанням ефекту ІНТМО.

### 5.2.2 Технічна реалізація операцій проварювання та сушіння вологої сировини в термостаті з використанням індукованого тепломасообміну

Операції проварювання до напівготовності та сушіння сировини проводяться всередині термостата з використанням ефекту ІНТМО. При цьому для проварювання сировини в термостаті створюються умови, за яких «запуск» ефекту ІНТМО відсутній, тобто для сировини забезпечується процес термостатування. Для подальшого сушіння сировини до гігроскопічного

вологовмісту створюються умови, за яких ефект ІнтМО «запускається». Забезпечити дані операції у відповідності до концептуальних рішень апаратів з використанням ефекту ІнтМО можна різними шляхами.

Провести проварювання сировини у апараті, в якому може бути реалізований ефект ІнтМО, можна наступним чином. Для цього необхідно забезпечити умови, які не задовольняють необхідні для його організації вимоги. Такими вимогами є наявність енергетичного бар'єру для «запуску» ІнтМО та наявність флуктуації на границі розділу між внутрішнім та зовнішнім середовищем термостата. Порушити першу вимогу можна шляхом закривання обтюраторів, або взагалі не створювати обтюратори на внутрішніх стінках термостата. Порушити другу вимогу, можна не створюючи флуктуації в обтюраторі, тобто уникнути обдування обтюратора потоком повітря, або зупиняючи рух повітря відносно обтюраторів.

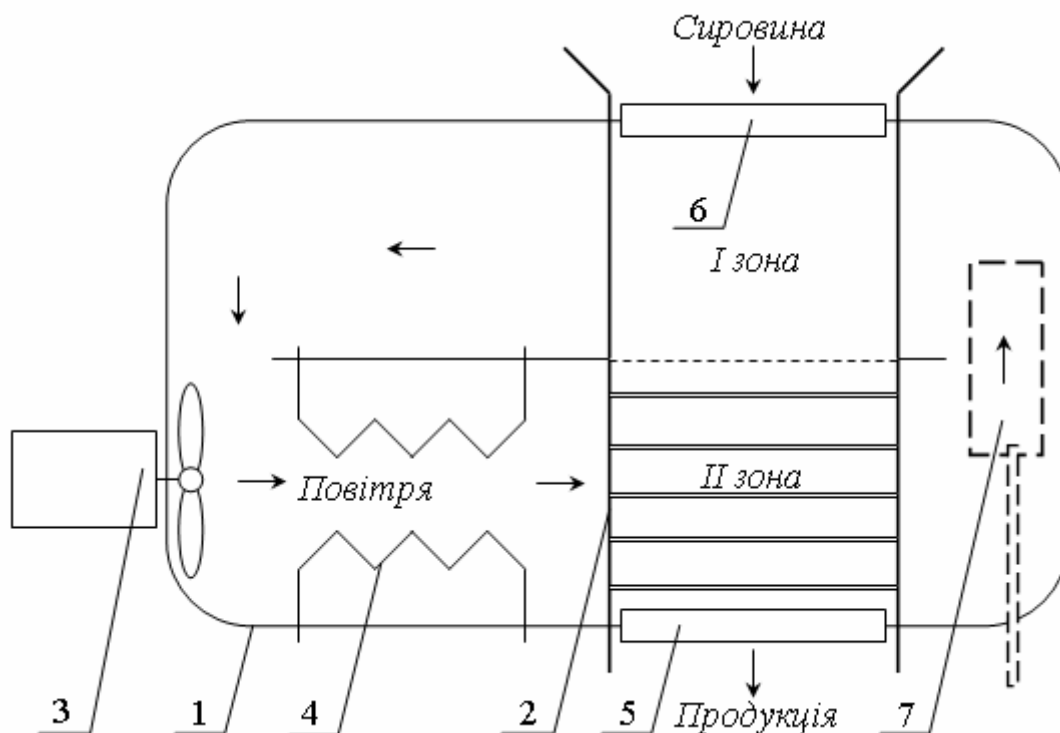
Операція подальшого сушіння сировини, яка доведена до напівготовності, забезпечується шляхом «запуску» та реалізації ефекту ІнтМО. Для цього всі необхідні вимоги, описані у попередньому підрозділі (підрозд. 5.1), повинні бути виконані.

Термостатування внутрішньої частини термостата (ТМО-модуль для гідротермічної обробки з використанням ІнтМО), в якій знаходиться оброблювана сировина, може бути забезпечене також декількома шляхами, як під час проварювання, так і під час сушіння. Мається на увазі, що забезпечити термостатування сировини під час проварювання можна одним способом, а під час сушіння – іншим. При цьому обрати можна будь-який із способів наведених на рис. 5.6.

Необхідно відмітити, під час вибору технічної реалізації описаних операцій, як відмічено вище, до апарата висувались такі вимоги, як його універсальність та безперервність роботи.

Результатом є розробка, яка являє собою термостат, принципова схема якого наведена на рис. 5.13 [284, 285] (Додаток А.2). Термостат складається із зовнішніх стінок 1, що обмежують його від навколишнього середовища, та

внутрішніх стінок 2, що обмежують його внутрішній виділений об'єм, в якому знаходиться сировина. Між зовнішніми та внутрішніми стінками розміщені вентилятор 3 та нагрівачі 4. Об'єм між зовнішніми та внутрішніми стінками заповнений повітрям навколишнього середовища.



**Рисунок 5.13 – Принципова схема установки для гідротермічної обробки крупи з використанням ефекту ІнТМО: 1, 2 – зовнішні та внутрішні стінки термостата; 3 – вентилятор; 4 – нагрівачі; 5, 6 – дозуючі шнеки; 7 – конденсатор з конденсатовідведенням**

Термостатування внутрішнього виділеного об'єма термостата (ТМО-модуля) забезпечується повітрям, яке рухається по об'єму між зовнішніми та внутрішніми стінками термостата завдяки роботі вентилятора. Нагрівання повітря до заданої температури забезпечується нагрівачами. Тепло до ТМО-модуля передається конвективно. Використання такого способу підведення теплоти дає можливість використовувати такий апарат не тільки для гідротермічної обробки сировини, але й для зневоднення сировини

способом ЗТП-сушіння, за умови використання відповідної конструкції ТМО-модуля, що робить пристрій універсальним.

Внутрішні стінки, що обмежують внутрішній виділений об'єм термостата (ТМО-модуль), виконані таким чином, що організовується розділення цієї частини термостата на дві зони. На внутрішніх стінках термостата у першій зоні, призначеній для проварювання сировини до напівготовності, відсутні обтюратори, тому «запуск» ефекту ІнТМО в цій зоні не відбувається. Сушіння сировини проводиться у другій зоні внутрішнього виділеного об'єму термостата (ТМО-модуля). Функції обтюраторів виконують зазори наявні на стінках, що обмежують внутрішню частину термостата, з частиною сировини, що прилягає до них.

Флуктуації параметрів газового середовища в обтюраторі (концентрації молекул води) створюються потоком повітря в об'ємі між внутрішніми та зовнішніми стінками термостата, який організовується роботою вентилятора. Таким чином даний потік повітря виконує дві функції – термостатування та створення флуктуації.

У верхній першій зоні ТМО-модуля виконаний завантажувальний бункер, через який сировина надходить до неї, а у нижній другій зоні – вивантажувальний отвір, через який вивантажується готова продукція. Сировина спочатку надходить до першої зони ТМО-модуля, де вона проварюється до напівготовності, а після цього – до другої, де вона зневоднюється до гігроскопічного вологовмісту. Тривалість обробки сировини регулюється або довжиною зон, або швидкістю руху сировини. Рівномірність руху сировини регулюється дозуючими шнеками 5 та 6. Проходячи через конденсатор 7 частина випарованої вологи з повітря конденсується й стікає в конденсатовідводчик. Дані конструкційні особливості внутрішньої частини термостата дозволяють зробити процес гідротермічної обробки універсальним та використати як прототип апарата ЗТП-сушарку.

### 5.2.3 Раціональні режими отримання швидковідновлюваних каш з використанням ефекту індукованого тепломасообміну

Під режимом отримання кінцевої продукції мається на увазі [286-288]:

- вид сировини, яку можна обробити розробленим способом;
- режими попередньої обробки сировини: перед проварюванням – тривалість замочування; перед сушінням – тривалість проварювання;
- форма, конструкція та геометричні розміри внутрішньої частини термостата;
- температура термостата.

Раціональними вважаються такі режими обробки сировини, які будуть забезпечувати [286-288]:

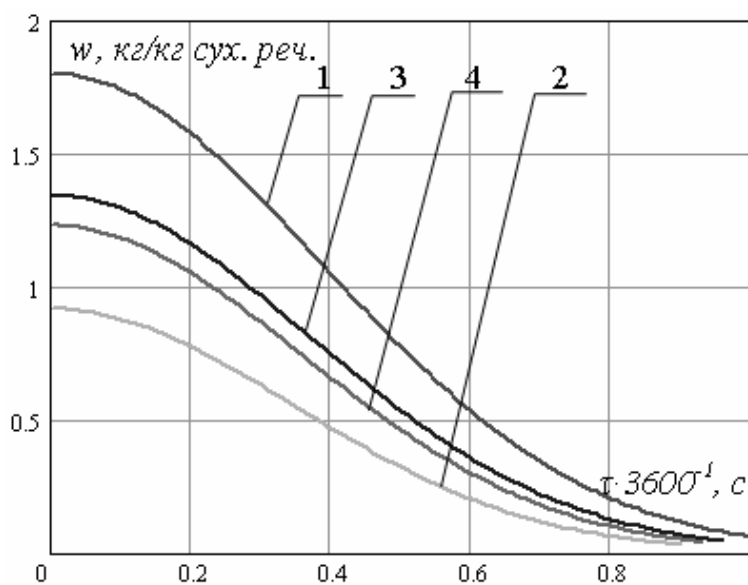
- мінімальну тривалість та енергоємність процесів підготовки сировини до гідротермічної обробки;
- максимальну енергоефективність процесу гідротермічної обробки;
- максимально високі функціонально-технологічні властивості готової продукції.

Багатофакторність процесу обробки та велика кількість критеріїв раціональності вимагають вибору методу рішення поставленого завдання. Використання для цього математичних методів, наприклад регресійного аналізу, ускладнено великою кількістю змінних. Тому в роботі використаний аналіз, заснований на визначенні, спочатку, діапазонів раціональних режимів, а після цього – виборі раціонального режиму.

Першим чинником є вид сировини, яку можна обробити розробленим способом [280, 284]. Оскільки в апараті, який розробляється, функції обтюратора виконують зазори у внутрішніх стінках термостата та сировина, що прилягає до них, то основними вимогами до сировини під час її гідротермічної обробки з використанням ефекту ІнтМО є те, що вона не повинна змінювати свій об'єм більше ніж на 10...15% та величина частинок сировини не повинна бути менша за ширину зазору (1 мм). На відповідність



даним вимогам досліджувались гречана, пшоняна, ячмінна та пшенична крупи із суцільного ядра: обрана сировина має велику кількість сухих речовин (понад 80%), внаслідок цього зміни об'єму під час гідротермічної обробки не спостерігалось (не більше ніж на 5...7%); розмір частинок сировини більше за 1 мм.



**Рисунок 5.14 – Кінетика зневоднення з використанням ефекту ІнТМО круп після проварювання: 1 – гречана; 2 – пшоняна; 3 – ячмінна; 4 – пшенична**

Процес зневоднення досліджуваних видів сировини триває практично однаковий час та має характер типовий для ефекту ІнТМО (рис. 5.14). За виконання необхідних та достатніх умов для реалізації ефекту ІнТМО сировина, яка знаходиться у ТМО-модулі, визначає його внутрішній тепловологоперенос. Оскільки оброблювана сировина має близькі за значенням фізичні властивості, то характер протікання ефекту ІнТМО для неї буде однаковим.

Таким чином, обрані види круп відповідають всім вимогам, що висуваються до сировини для реалізації ефекту ІнТМО, причому раціональні режими та розроблена установка є універсальними для виробництва швидковідновлюваних каш із обраної сировини.

Як описано вище, гідротермічну обробку сировини в термостаті за розробленим способом можна розділити на два етапи: проварювання, за відсутності «запуску» ефекту ІнТМО, та зневоднення, за умови його реалізації.

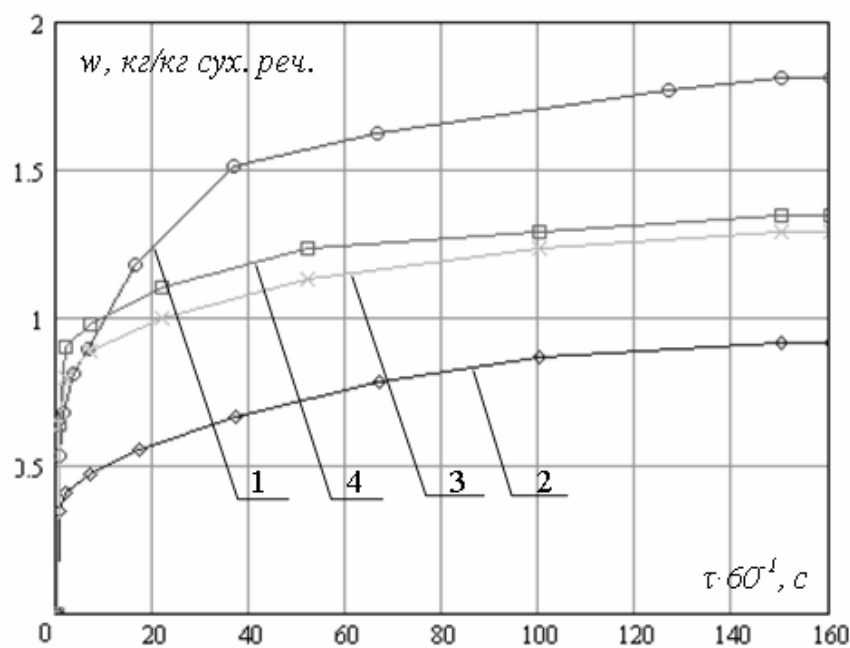


Рисунок 5.15 – Кінетика набухання круп: 1 – гречана; 2 – пшоняна; 3 – ячмінна; 4 – пшенична

Першим чинником є попередня підготовка сировини перед проварюванням, яка полягає у її замочуванні до визначеного вологовмісту. Дослідженнями кінетики набухання круп (рис. 5.15) (гречаної, пшоняної, ячмінної, пшеничної) об'ємним методом на приладі Догадкіна встановлено, що раціональною тривалістю замочування для всіх зразків є тривалість 120 хв., оскільки за її збільшення відносно даного значення, вологовміст сировини змінюється не більше ніж на 5...7% [220].

Наступними чинниками, які впливають на попередню підготовку сировини перед зневодненням з використанням ефекту ІнТМО, є температура, за якої відбувається проварювання сировини, та тривалість даного процесу.

Температура сировини, менше якої проварювання не можливе – 80 °С, оскільки температура клейстеризації крохмалю дорівнює 60...80 °С, а коагуляції білків – 70...75 °С [289-292]. Таким чином, температура сировини повинна бути не меншою за 80 °С, інакше крупа не провариться до напівготовності.

Під час визначення максимальної температури проварювання керувались тим, що кількість вологи, в якій проварюється сировина обмежена тією кількістю, яку поглинула сировина під час замочування. Таким чином, за інтенсивного кипіння волога швидко випарюється і сировина не проварюється до відповідної готовності. Граничною температурою сировини, за якої води для проварювання залишається достатня кількість, є температура 95...100 °С. За збільшення температури відбувається викид води у газовому стані крізь завантажувальний бункер.

Таким чином, для проварювання сировини температура термостата повинна обиратися із діапазону температур від 85 до 95 °С.

Раціональна тривалість проварювання визначалась шляхом періодичної органолептичної та мікроскопічної оцінки досліджуваної сировини під час даного процесу в термостаті. За температури термостата 85 °С вона складає 60 хв., а за температури 93...95 °С – 55 хв.

Дослідженнями кінетики зневоднення вологої сировини під час ефекту ІНТМО за різної форми ТМО-модуля (табл. 5.1) та, виходячи із вимог до його форми з точки зору одночасної реалізації процесів проварювання та зневоднення вологої сировини в одному апараті, встановлено, що раціональною формою ТМО-модуля, за мінімальних конструкційних змін у сушильній камері типової ЗТП-сушарки, є паралелепіпедна форма.

Висота та довжина ТМО-модуля обмежені розмірами сушильної камери, таким чином варіювання його об'ємом можливе шляхом зміни його товщини. При цьому, оскільки ТМО-модуль має дві зони: зона для проварювання (без обтюраторів) та зона для зневоднення (наявні зазори на

стінках), то необхідно враховувати раціональні значення товщини для обох зон.

Таблиця 5.1

**Тривалість ефекту ІнТМО за температури термостата 90 °С різних видів сировини після проварювання за різної форми ТМО-модуля**

Сировина	Тривалість процесу зневоднення $(\tau \pm 5) \cdot 60^{-1}$ , с		
	форма ТМО-модуля:		
	ромбовидна	циліндрична	паралелепіпедна
Гречана крупа	60	62	60
Пшоняна крупа	60	60	55
Пшенична крупа	65	65	60

Очевидно ефективність як операції проварювання, так і операції зневоднення визначається тим, наскільки швидко температура сировини досягне потрібного значення та наскільки однорідним буде розподілення температури у ТМО-модулі [275].

Швидкість прогрівання сировини у ТМО-модулі визначається в основному опором тепловому потоку стінок та внутрішнього середовища термостата: чим менший опір тепловому потоку, тим швидше прогриваються внутрішні шари сировини. Опір тепловому потоку ТМО-модуля складається з опору стінки, яка її обмежує, та опору внутрішнього середовища. Оскільки стінка та внутрішнє середовище термостата розміщені послідовно, то сумарний опір дорівнює:

$$R_{\Sigma} = R_{ст.} + R_{вн.сер.} \quad (5.3)$$

де  $R_{\Sigma}$ ,  $R_{ст.}$ ,  $R_{вн.сер.}$  – сумарний опір тепловому потоку та опори внутрішньої стінки термостата (стінки ТМО-модуля) та його внутрішнього середовища, відповідно.

Опір тепловому потоку прямо пропорційний товщині та обернено пропорційний теплопровідності матеріалу, тобто:

$$R_{ст.} = \frac{\delta_{ст.}}{\lambda_{ст.}}, \quad (5.4)$$

$$R_{вн.сер.} = \frac{\delta_{вн.сер.}}{\lambda_{вн.сер.}}, \quad (5.5)$$

де  $\delta_{ст.}$  та  $\delta_{вн.сер.}$  – товщина стінки ТМО-модуля та його внутрішнього середовища;

$\lambda_{ст.}$  та  $\lambda_{вн.сер.}$  – теплопровідність матеріалу стінки ТМО-модуля та еквівалентний коефіцієнт теплопровідності внутрішнього середовища термостата.

Значення опорів тепловому потоку стінки ТМО-модуля та сировини, розраховані за формулами (5.4) та (5.5) з урахуванням формул (4.80)-(4.82),

наступні: для стінки  $R_{ст.} \approx 5 \cdot 10^{-6} \frac{м^2 \cdot К}{Вт}$ ; для різних видів сировини

(гречаної, пшоняної, пшеничної, ячмінної) у вологому (з вологовмістом від 0,9 до 1,8 *кг/кг сух. реч.*) та гігроскопічному (з вологовмістом від 0,09 до 0,12 *кг/кг сух. реч.*) стані коливається від  $5 \cdot 10^{-3}$  до  $0,2 \frac{м^2 \cdot К}{Вт}$ .

З проведених розрахунків видно, що опір тепловому потоку внутрішнього середовища термостата значно більший опору стінки ТМО-модуля – не менше ніж на три порядки. Таким чином, очевидно, існує необхідність перемішування сировини в процесі обробки з метою досягнення однорідності розподілення температури у внутрішньому середовищі термостата і, як наслідок, однорідності протікання процесу гідротермічної обробки сировини.

Для того, щоб примусити сировину перемішуватись, існує два способи: перший полягає у збільшенні швидкості руху сировини; другий – у

збільшенні площі поперечного перерізу ТМО-модуля за рахунок збільшення його товщини. Перший спосіб за даної технічної реалізації процесу не використовувався через те, що сировина повинна знаходитись всередині термостата визначений технологічний час (наприклад, для проварювання сировини не менше 55...60 хв.), а збільшення швидкості приведе до збільшення довжини ТМО-модуля, величина якого обмежена розмірами прототипу (ЗТП-сушарки, яку обрано як прототип універсальної установки для гідротермічної обробки круп з ІнТМО). Таким чином, було обрано другий спосіб.

Плин сировини всередині ТМО-модуля здійснюється під дією сили тяжіння, рівномірність руху та його швидкість забезпечується завантажувальним та вивантажувальним шнеками. Теоретичне моделювання плину сировини ускладнене наступним. По-перше, окрім того, що частинки різних видів сировини відрізняються за розмірами, то й частинки однієї і тієї ж сировини в залежності від перерізу мають різний розмір (так для гречаної крупи він лежить в діапазоні від 2 до 5 мм, а, наприклад, для ячмінної – від 2 до 8 мм). По-друге, оскільки сировина волога, то між її частинками та між частинками і стінкою ТМО-модуля окрім гравітаційних сил виникають сили, обумовлені поверхневим натягом води, яка знаходиться на її поверхні. Таким чином, дослідження плину проводились експериментально шляхом візуального його спостереження.

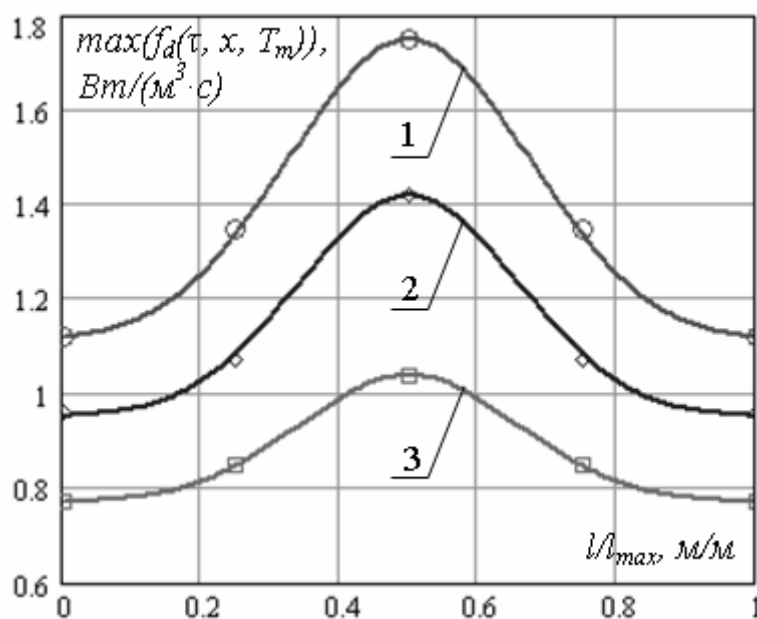
Для візуального дослідження плину сировини всередині ТМО-модуля використовувалась установка, наведена у розділі 2 (рис. 2.10). В даній установці одна із стінок виконана зі скла. Як волога сировина використовувались крупи, які замочувались у воді протягом 2 годин за кімнатної температури: гречана, пшоняна, ячмінна. Для візуалізації плину в установку засипався шар пофарбованої сировини. Стінки, площини яких перпендикулярні до стінки із скла, зроблені таким чином, що існує можливість змінювати відстань між ними.

З фотографій плину вологої сировини в експериментальній установці (Додаток В) видно, ефективність перемішування сировини збільшується по мірі збільшення товщини зони, причому граничним значенням товщини, за якої перемішування сировини стає помітним, є товщина 20 мм. Виходячи з цього, раціональною товщиною зони ТМО-модуля без обтюраторів є товщина не менша за 20 мм.

Під час вибору раціональної товщини зони ТМО-модуля з обтюраторами використовувалась математична модель розвитку потужності дисипативних структур в ККПТ під час ІнТМО (підрозділ «4.2.3 Функція розвитку потужності дисипативних структур в ККПТ всередині термостата під час ІнТМО») [218, 293].

На рис. 5.16 наведено залежності значення максимуму функції розподілення потужності дисипативних структур від товщини зони ТМО-модуля з обтюраторами (20, 40 та 60 мм). Координата  $x$  на графіку пронормована на значення товщини даної зони, причому кожна залежність на свою товщину. Нормування проводилось для більш наочного порівняння характеристик наведених залежностей.

Із наведених результатів видно: залежності по мірі збільшення товщини зони із зазорами зміщуються відносно осі, на якій відкладено максимуми функції розподілення потужності дисипативних структур, в сторону менших значень, що свідчить про зменшення розвитку поверхні випару і, як наслідок, приводить до зменшення інтенсивності зневоднення сировини. В результаті цього тривалість сушіння зростає. Також необхідно відмітити, що по мірі збільшення товщини зони ТМО-модуля із обтюраторами зменшується різниця між максимумами функції розподілення для сировини під поверхнею та в центрі даної зони, що свідчить про віддалення характеру процесу зневоднення від характеру ефекту ІнТМО.



**Рисунок 5.16 – Максимум функції розподілення потужності дисипативних структур від товщини зони ТМО-модуля з обтюраторами для значень товщини, мм: 1 – 20; 2 – 40; 3 – 60**

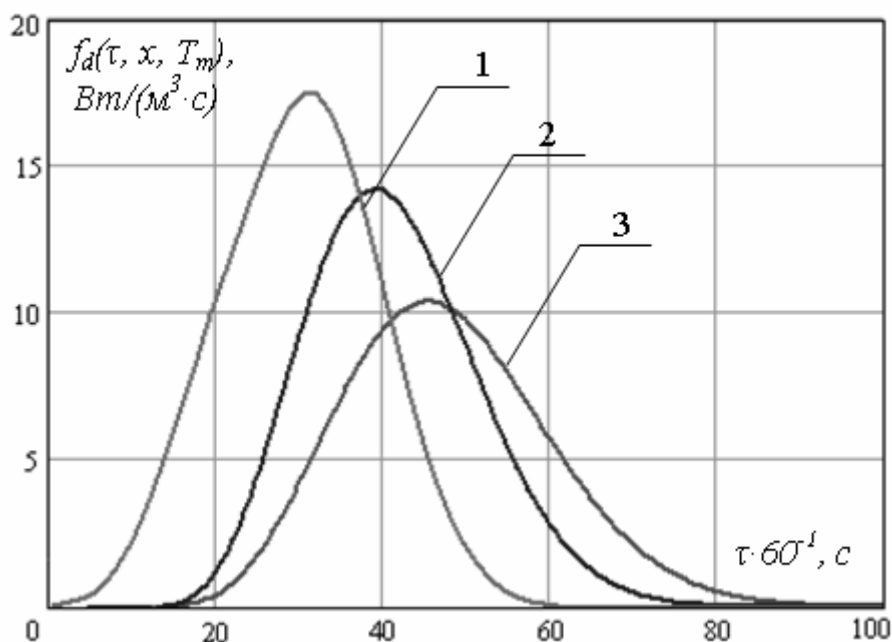
Із проведених розрахунків також можна знайти тривалість сушіння сировини за різної товщини зони ТМО-модуля з обтюраторами. На рис. 5.17 наведено зміну функції розподілення потужності дисипативних структур з часом для центрального шару сировини. Координата  $x$  центрального шару сировини для даної частини термостата з товщиною 20 мм дорівнює 10 мм, з товщиною 40 мм – 20 мм, з товщиною 60 мм – 30 мм. Тривалістю процесу сушіння вважався час, за якого функція розподілення потужності дисипативних структур досягає нуля.

Так для сушіння ККПТ за температури сушильного агента 80 °С розрахована тривалість процесу дорівнює: для 20 мм – 60 хв., для 40 мм – 75 хв., для 60 мм – 85 хв.

Таким чином, у відповідності до розробленої математичної моделі розвитку потужності дисипативних структур в ККПТ під час ІтМО, з точки зору інтенсивності протікання даного ефекту, і, як наслідок, зменшення тривалості зневоднення сировини, раціональною товщиною зони ТМО-модуля з обтюраторами є товщина 20 мм. Враховуючи експериментальні та



теоретичні дослідження товщини зон ТМО-модуля, призначених як для гідротермічної обробки, так і для зневоднення сировини, раціональною слід вважати товщину 20 мм.



**Рисунок 5.17 – Функція розподілення потужності дисипативних структур в центральному шарі сировини за різної товщини зони ТМО-модуля з обтюраторами, мм: 1 – 20; 2 – 40; 3 – 60**

Ще одним чинником, який суттєво впливає на раціональність обраного режиму, є температура термостата під час зневоднення сировини. В підрозділі «3.3.7 Фазові траєкторії системи під час ефекту ІнТМО за різних температур термостата та координати» доведено, енергоефективним є використання максимально можливої для організації ефекту ІнТМО температури термостата.

Таким чином, враховуючи вимоги до температури термостата під час проварювання сировини та під час її зневоднення з використанням ефекту ІнТМО, раціональною температурою слід вважати температуру не більше 95 °С. Саме це значення температури і було обрано для гідротермічної обробки круп з використанням ефекту ІнТМО. Тривалість сушіння за цієї температури дорівнює 55...60 хв.

Таблиця 5.2

**Раціональні режими отримання швидковідновлюваних каш та конструкційні особливості апарата з використанням ефекту ІнТМО**

Чинник	Проварювання	Сушіння	Загальний чинник або його значення
Спосіб підготовки	замочування протягом 120 хв.	проварювання протягом 60 хв.	тривалість замочування (120 хв.) + тривалість проварювання (60 хв.) + тривалість сушіння (60 хв.) = 240 хв.
форма ТМО-модуля:	паралелепіпедна	паралелепіпедна	паралелепіпедна
розташування в термостаті	вертикальне	вертикальне	вертикальне
розміри, мм	250×500×20	250×500×20	500×500×20
Температура термостата, °С	95	95	95

Швидкість руху сировини дорівнює 4 мм/хв. та забезпечується шнеком з валом-турбіною. Привід вала забезпечується трифазним асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором через понижуючий редуктор.

Таким чином, раціональними слід вважати режими наведені в табл. 5.2.

#### 5.2.4 Розрахунок апарата для гідротермічної обробки крупи з використанням ефекту індукованого тепломасообміну та його впровадження у виробництво

За основу під час розробки апарата для гідротермічної обробки круп з використанням ефекту ІнтМО обрано ЗТП-сушарку – ЗТП-30. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження дозволили отримати емпіричні співвідношення, необхідні для інженерного розрахунку конструкційних особливостей апарата, який використано для гідротермічної обробки круп з використанням ефекту ІнтМО.

Під час розробки апарата головними вимогами були: дешевизна виготовлення, простота й надійність в експлуатації, мінімальні енерговитрати на процес гідротермічної обробки. Вихідні дані для розробки і створення установки для гідротермічної обробки круп з використанням ІнтМО наведені в табл. 5.3.

**Таблиця 5.3.**

#### Вихідні дані для розробки установки для гідротермічної обробки круп

Сировина	крупа
Продуктивність по сушеній продукції, кг/год	4...6
Завантаження сировини	автоматичне
Вивантаження продукту	автоматичне
Встановлена потужність, кВт	не більше 20
Контроль за режимом сушіння	автоматичний
Керування калориферами	автоматичне, електронне
Кількість обслуговуючого персоналу, осіб	1...2
Додаткові вимоги	відповідність стандартам, техніці безпеки та протипожежній безпеці

Як відмічено вище, у відповідності з вихідними даними була обрана сушильна установка періодичної дії з електрокалорифером – ЗТП-30.

Спосіб підведення теплоти до ТМО-модуля – конвективний, теплоносій – повітря. Для зменшення енерговитрат в установці організована рециркуляція теплоносія із частковою конденсацією пари води на конденсаторі. Конденсатор омивається приточним повітрям, при цьому приточне повітря підігрівається в конденсаторі та потім надходить у камеру, де калорифери розігрівають його до заданої температури.

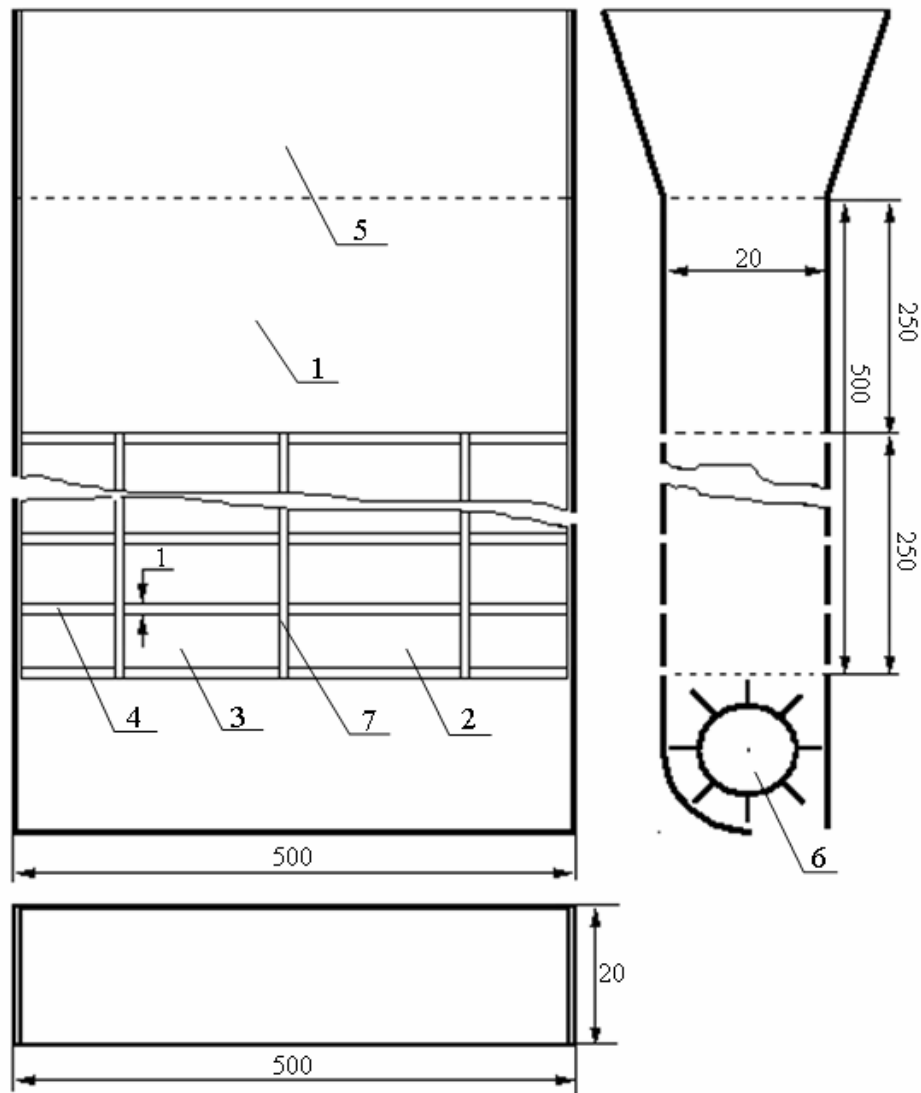
Відмінність розробленого апарата від прототипу полягає в наступному. По перше, робоча камера (сушильна камера сушарки) має конструкційні особливості: у верхній та нижній стінках камери зроблені отвори – верхній за формою завантажувального бункера, а нижній – за формою поперечного перерізу ТМО-модуля.

По друге, для вивантаження сушеної продукції через нижній отвір у ємність для готового продукту установку підняли на 500 мм над підлогою за рахунок підніжок відповідної довжини. В середині ТМО камери зроблені держателі, які дають можливість використовувати типовий паралелепіпедний ТМО-модуль для сушіння за умови демонтажу ТМО-модуля для гідротермічної обробки. Таким чином, розроблений апарат є універсальним: в ньому можна проводити як гідротермічну обробку круп, так і сушіння сировини, властивості якої задовольняють вимогам ефекту ІнТМО.

Основний робочий елемент – ТМО-модуль для гідротермічної обробки з використанням ІнТМО, зображений на рис. 5.18.

Розміри поверхні ТМО-модуля обирали виходячи з розмірів тепломасообмінної камери та міркувань зручності роботи, а товщину – з раціональних режимів проварювання та сушіння. В такому модулі розміщається до 4 кг сировини. ТМО-модуль складається з двох основних частин: із обтюраторами та без них.

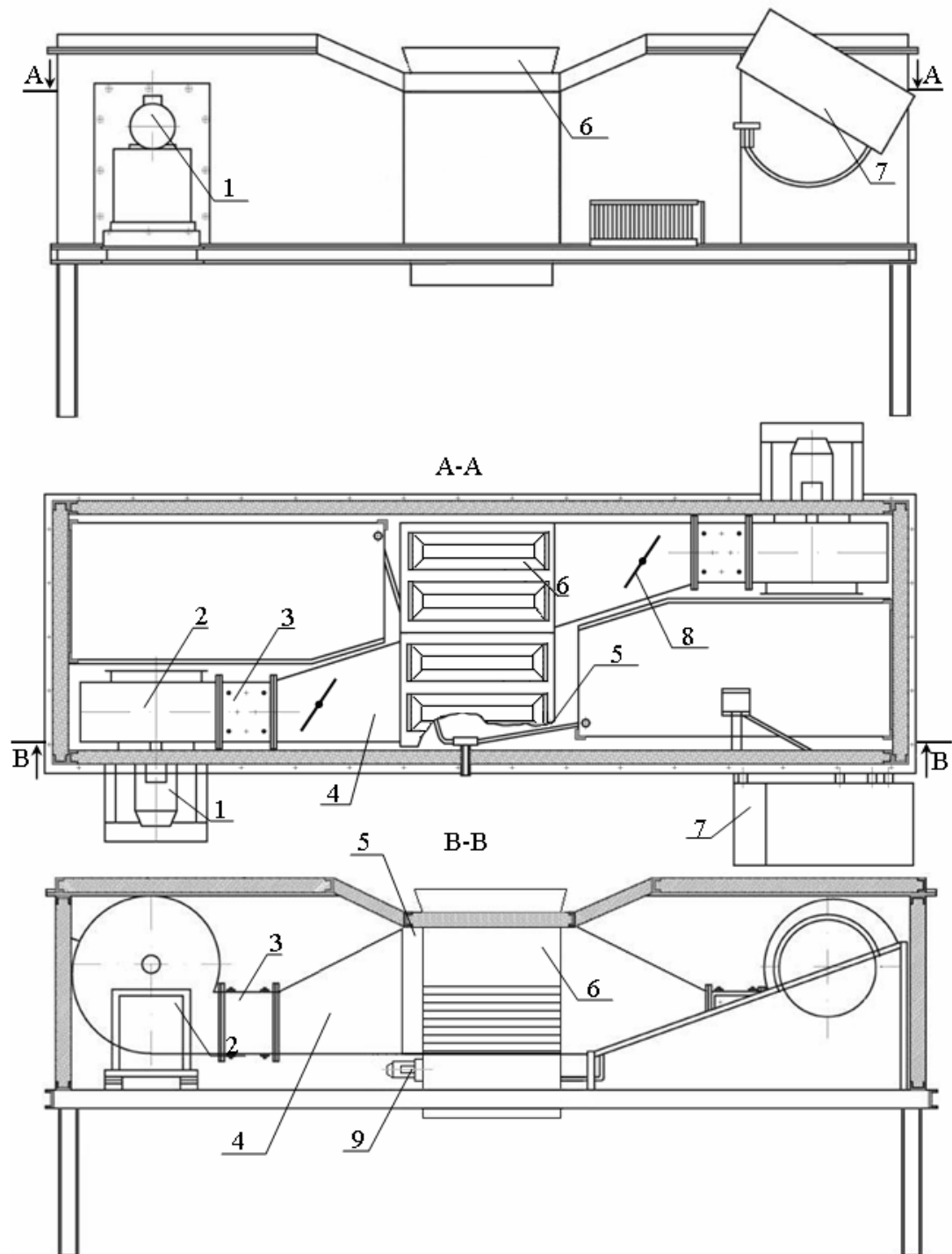
Схема розробленого апарата для гідротермічної обробки круп з використанням ефекту ІнТМО, де вихідною продукцією є швидковідновлювані каші, наведена на рис. 5.19.



**Рисунок 5.18 – Тепломасообмінний модуль для гідротермічної обробки круп з використанням ІнТМО: 1 – частина для проварювання сировини; 2 – частина для сушіння сировини; 3 – теплообмінні поверхні; 4 – обтіюатори; 5 – завантажувальний бункер; 6 – вивантажувальний шнек; 7 – пластини жорсткості**

Апарат складається з електродвигуна 1, вентилятора 2, електрокалориферів 3, повітровою 4, робочої ТМО камери 5, в яку розміщується ТМО-модуль для гідротермічної обробки крупи, пульта

керування 7, шибера 8 та двигуна шнека з редуктором для вивантаження готової продукції.



**Рисунок 5.19 – Схема універсального апарата для гідротермічної обробки круп з використанням ефекту ІпТМО: 1 – електродвигун; 2 – вентилятор; 3 – електрокалорифери; 4 – повітровід; 5 – ТМО-камера; 6 – ТМО-модуль; 7 – пульт керування; 8 – шибер; 9 – двигун шнека з редуктором**

Принцип дії установки наступний. Повітря відцентровим вентилятором нагнітається в блок калориферів, де нагрівається до необхідної температури і далі повітропроводом направляється в робочу ТМО камеру, де знаходиться ТМО-модуль. Потім викидається у вільний об'єм установки. Проходячи біля конденсатору, частина вологи з повітря конденсується й стікає в конденсатовідводчик. Для знімання надлишків теплоти з поверхні конденсації використовується повітря навколишнього середовища (виробничого приміщення), що проходить зі зворотної сторони конденсатора. Забравши теплоту, що виділилася при конденсації, зовнішнє повітря підігрівається та, змішавшись із пароповітряним середовищем, надходить на вхід вентилятора. Таким чином контур руху повітря, що виконує функції термостатування та створення флуктуацій в обтюаторах замикається, а теплота, витрачена на процес, максимально утилізується. Для регулювання ступеня змішання свіжого повітря з робочим, на вході встановлений шибер, положення якого визначає кількість свіжого повітря. Надходження свіжого повітря забезпечується різницею тисків між атмосферним тиском і тиском в зоні всосу відцентрового вентилятора.

Сировина, попередньо замочена, засипається через завантажувальний бункер у ТМО-модуль (внутрішнє середовище термостата). В розробленому апараті одночасно використовується чотири ТМО-модуля для гідротермічної обробки. Між стінками ТМО-модулів є напрямні для потоку повітря та вставки-турбулізатори, які створюють необхідний гідродинамічний режим його плину.

Установка оснащена електронним пультом керування, що забезпечує контроль і автоматичну підтримку температури всередині апарата (температуру термостата).

На підставі отриманих у роботі емпіричних залежностей розроблена програма розрахунку апарата для гідротермічної обробки круп з використанням пакету програм MathCad. Вихідними даними для розрахунку являються:

- навантаження сировини на один ТМО-модуль, кг;
- кількість ТМО-модулів в робочій камері, шт.;
- початковий і кінцевий вологовміст сировини, кг/кг сух. реч.;
- температура всередині апарата (температура термостата), °С;
- тривалість розігріву камери, хв.;
- геометричні розміри та маса апарата;
- характеристики теплоізоляції (товщина, теплопровідність);
- геометрія повітропроводу, у тому числі: розміри, дифузорність і конфузорність каналів, живий перетин;
- швидкість потоку повітря в живому перетині робочої ТМО камери, м/с;
- перепад температур потоку повітря між входом і виходом у робочій ТМО камері.

У загальному вигляді рівняння теплового балансу апарата для гідротермічної обробки круп з використанням ефекту ІнТМО можна записати так:

$$q_k = q_{\text{вип}} + q_{\text{мат}}^{\text{ex}} + \sum q_{\text{втр}}, \quad (5.6)$$

де  $q_k$  – питома кількість теплоти, що передається потоку повітря між зовнішніми та внутрішніми стінками термостата від калориферів, Дж/кг вип. води;

$q_{\text{вип}}$  – питома кількість теплоти, що витрачається на випаровування води під час ІнТМО, Дж/кг вип. води;

$q_{\text{мат}}^{\text{ex}}$  – питома кількість теплоти, що витрачається на нагрівання сировини (матеріалу), яка надходить у внутрішню частину термостата (системна вода, сухі речовини, пароповітряна суміш), Дж/кг вип. води;

$\sum q_{\text{втр}}$  – сума втрат теплоти, Дж/кг вип. води.

Питома кількість теплоти, що витрачається на випаровування системної води під час ІнТМО, дорівнює:



$$q_{c.v.} = \frac{r \cdot m_{\text{вип.с.в.}}}{m_{\text{вип.с.в.}}} = r, \quad (5.7)$$

де  $r$  – питома теплота пароутворення, Дж/кг вип. води;

$m_{\text{вип.с.в.}}$  – маса випаруваної води, кг вип. води.

Питома кількість теплоти, що витрачається на нагрівання сировини, яка надходить до внутрішньої частини апарата:

$$q_{\text{мат}}^{\text{вх}} = \frac{1}{W_{\text{мат}}^{\text{вх}}} \cdot c_{\text{мат}}^{\text{вх}} \cdot (t_{\text{вих}} - t_{\text{вх}}), \quad (5.8)$$

де  $W_{\text{мат}}^{\text{вх}}$  – вхідна вологість сировини, %;

$c_{\text{мат}}^{\text{вх}}$  – теплоємність сировини на вході у внутрішню частину апарата для гідротермічної обробки, Дж/(кг·К);

$t_{\text{вх}}$  та  $t_{\text{вих}}$  – вхідна та вихідна температура сировини, К.

Сума втрат теплоти:

$$\sum q_{\text{втр}} = q_{\text{мат}}^{\text{вих}} + q_{\text{от.с.}}, \quad (5.9)$$

де  $q_{\text{мат}}^{\text{вих}}$  – питома кількість теплоти, що втрачається з кінцевою продукцією, яка виходить із внутрішньої частини термостата, Дж/кг вип. води;

$q_{\text{от.с.}}$  – питома кількість теплоти, що втрачається в оточуюче середовище, Дж/кг вип. води.

Втрати теплоти з кінцевою продукцією можна розрахувати за формулою:

$$q_{\text{мат}}^{\text{вих}} = \frac{100 - W_{\text{мат}}^{\text{вх}}}{W_{\text{мат}}^{\text{вх}} - W_{\text{мат}}^{\text{вих}}} \cdot c_{\text{мат}}^{\text{вих}} \cdot (t_{\text{вих}} - t_{\text{вх}}), \quad (5.10)$$

де  $W_{\text{mat}}^{\text{вх}}$  та  $W_{\text{mat}}^{\text{вих}}$  – вхідна та вихідна вологість сировини, %;

$c_{\text{mat}}^{\text{вих}}$  – теплоємність сировини на виході із внутрішньої частини апарата для гідротермічної обробки (кінцева продукція), Дж/(кг·К);

$t_{\text{вх}}$  та  $t_{\text{вих}}$  – вхідна та вихідна температура сировини, К.

Втрати в оточуюче середовище складаються із втрат через зовнішню стінку апарата та витік повітря із об'єму, обмеженого внутрішніми та зовнішніми стінками:

$$q_{\text{от.с.}} = q_{\text{ст}} + q_{\text{внт.нов.}} \quad (5.11)$$

Втрати через зовнішні стінки апарата для гідротермічної обробки розраховуються за формулою:

$$q_{\text{ст}} = \frac{\sum \alpha_2 (t_{\text{ст}} - t_{\text{прим}}) F}{m_{\text{внт.с.в.}}}, \quad (5.12)$$

де  $t_{\text{прим}}$  та  $t_{\text{ст}}$  – температура приміщення, де знаходиться апарат, та зовнішньої поверхні зовнішніх стінок апарата, К;

$F$  – площа поверхні стінок, м<sup>2</sup>;

$\alpha_2$  – коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні зовнішніх стінок апарата, Дж/(м<sup>2</sup>·с·К).

Втрати теплоти з витіком повітря:

$$q_{\text{внт.нов.}} = \frac{L_{\text{внт.нов.}}}{m_{\text{внт.с.в.}}} \cdot c_{\text{внт.нов.}} (t_{\text{сер}} - t_{\text{прим}}), \quad (5.13)$$

де  $L_{\text{внт.нов.}}$  – витік повітря, який визначається експериментально, кг/с;

$c_{\text{вип.пов.}}$  – теплоємність повітря між внутрішніми та зовнішніми стінками апарата,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ ;

$t_{\text{сер}}$  – середня температура стінок апарата,  $\text{K}$ .

У підрозділі «3.3.8 Вплив швидкості потоку повітря, що рухається відносно обтюратора термостата, на характер ІнТМО» встановлено, що теплового потоку від стінок термостата недостатньо для відтворення кінетики теплового потоку, який витрачається у ТМО-модулі термостата під час ІнТМО. Тому слід вважати, що дефіцит теплоти, який має місце під час даного ефекту, компенсується роботою, що індукується потоком повітря, який рухається відносно зовнішньої поверхні обтюратора.

Таким чином, з урахуванням вищевикладеного ствердження, розгорнуте рівняння теплового балансу апарата для гідротермічної обробки круп з використанням ефекту ІнТМО буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} I_0 + q_k + c_{\text{с.в.}} \cdot t_{\text{вх}} + \frac{m_{\text{мат}}^{\text{вх}}}{m_{\text{вип.с.в.}}} c_{\text{мат}}^{\text{вх}} \cdot t_{\text{вх}} + E_A^* = \\ = I_2 + \frac{m_{\text{мат}}^{\text{вих}}}{m_{\text{вип.с.в.}}} c_{\text{мат}}^{\text{вих}} \cdot t_{\text{вих}} + q_{\text{вип.пов.}} \end{aligned} \quad (5.14)$$

де  $I$  – питомі витрати повітря в об'ємі між зовнішніми та внутрішніми стінками апарата,  $\text{кг}/\text{кг вип. води}$ ;

$I_0$  та  $I_2$  – ентальпія повітря, що надходить до блоку калориферів, та повітря, що виходить із ТМО камери,  $\text{Дж}/\text{кг сух. пов.}$ ;

$c_{\text{с.в.}}$  – теплоємність води,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ ;

$E_A^*$  – питома енергія активації (на кг випаруваної води) ефекту ІнТМО, яка забезпечується по величині роботою потоку повітря, що продувається відносно зовнішньої поверхні обтюратора ТМО-модуля,  $\text{Дж}/\text{кг вип. води}$ .

Перетворимо формулу (5.14) та отримаємо витрати теплоти в калорифері:

$$q_{\kappa} = l(I_2 - I_0) - E_A^* + \frac{m_{\text{mat}}^{\text{вих}}}{m_{\text{вип.с.в.}}} c_{\text{mat}}^{\text{вих}} \cdot (t_{\text{вих}} - t_{\text{ex}}) + q_{\text{вип.нов.}} - c_{\text{с.в.}} t_{\text{ex}}. \quad (5.15)$$

Врахуємо, що:

$$q_{\kappa} = l(I_2 - I_1), \quad (5.16)$$

де  $I_1$  – ентальпія повітря, що виходить із блоку калориферів, та надходить до ТМО камери, Дж/кг сух. пов.

Необхідно відмітити, що маса випаруваної води  $m_{\text{вип.с.в.}}$  є тією частиною системної води термостата, яка бере участь у ІнТМО. Виходячи з цього слід враховувати:

$$m_{\text{вип.с.в.}} = A_0 \cdot m_{\text{с.в.}}, \quad (5.17)$$

де  $A_0$  – частина системної води, що бере участь у ІнТМО, яка визначається калориметричним або ЕПР-методом, кг/кг;

$m_{\text{с.в.}}$  – маса системної води в термостаті, кг.

Враховуючи (5.15), (5.16) та (5.17), після простих перетворень можна отримати основне рівняння, яке характеризує зміну ентальпії пароповітряної суміші в апараті для гідротермічної обробки круп з використанням ефекту ІнТМО:

$$I_2 = I_1 + \frac{1}{l} \cdot \left( l(I_2 - I_0) - E_A^* + \frac{m_{\text{mat}}^{\text{вих}}}{A_0 \cdot m_{\text{с.в.}}} c_{\text{mat}}^{\text{вих}} \cdot (t_{\text{вих}} - t_{\text{ex}}) + q_{\text{вип.нов.}} - c_{\text{с.в.}} t_{\text{ex}} \right). \quad (5.18)$$

Дане рівняння використовується для розрахунку технічних характеристик апарата. Необхідно відмітити, що оскільки апарат працює з рециркуляцією, то слід вважати, що:

$$I_0 = I_{mix}, \quad (5.19)$$

де  $I_{mix}$  – ентальпія суміші повітря, що відпрацювало, та повітря, що надходить ззовні до об'єму, обмеженого зовнішніми та внутрішніми стінками апарата.

$I_{mix}$  розраховується за формулою:

$$I_{mix} = \frac{I_0 + n \cdot I_2}{1 + n}, \quad (5.20)$$

де  $n$  – кількість кг відпрацьованого повітря на 1 кг повітря навколишнього середовища (виробничого приміщення).

Рівняння для розрахунку питомих витрат повітря  $l$  в об'ємі між зовнішніми та внутрішніми стінками апарата розраховуються із рівняння балансу вологи апарата (рівність маси води, що надійшла в ТМО камеру з сировиною та повітрям, масі води, що вийшла із ТМО камери разом із відпрацьованим повітрям) для гідротермічної обробки та має вигляд [45]:

$$l = 1,6 \left( \frac{B}{\varphi_2 \cdot p_2} - 1 \right), \quad (5.21)$$

де  $B$  – атмосферний тиск, Па;

$\varphi_2$  та  $p_2$  – відносна вологість повітря та тиск насиченої пари води на виході з ТМО камери, відповідно у % та Па.

Таким чином, виходячи з обраних раціональних режимів, за запропонованими і стандартними рівняннями теплового й масового балансів були розраховані основні технічні характеристики апарата малої

продуктивності для гідротермічної обробки круп з використанням ефекту ІнТМО (Додаток Б.2).

Основні характеристики розробленого апарата наведені в табл. 5.4.

Таблиця 5.4

**Основні характеристики апарата для гідротермічної обробки круп з ІнТМО**

Характеристика	Значення характеристики
Встановлена потужність, кВт:	
калориферів	$11,9 \pm 1,1$
вентилятора	$1,0 \pm 0,1$
Витрата енергії $E \cdot 10^{-6}$ , Дж/кг:	
по готовій продукції	$8,1 \pm 1,8$
по випаруваній волозі	$3,9 \pm 0,1$
Теплові втрати, кВт	$0,83 \pm 0,05$
Продуктивність, кг/год	
по сировині	$16 \pm 1$
по сухому	$6,0 \pm 0,3$
по випаруваній волозі	$5,8 \pm 0,2$
Кількість ТМО-модулів, шт.	4
Повний тиск у тракці повітровоу, Па	$652 \pm 50$

З порівняння даних по питомим витратам енергії на кг готової продукції для різних способів виробництва швидковідновлюваних каш, які наведені в табл. 5.5 [294-299], видно, що при отриманні швидковідновлюваних каш за запропонованим способом на розробленій установці питомі енерговитрати менші у порівнянні з іншими способами, які застосовуються для виробництва аналогічної продукції, більше ніж у 1,3 разу.

Таблиця 5.5

**Енерговитрати на кг готової продукції при виробництві швидко відновлюваних каш  
різними способами**

Спосіб виробництва швидко відновлюваних каш	Енерговитрати, МДж/кг готової продукції
Замочування+ГЧ-обробка+плющення+темперування (ТМ «Терра»)	11...14
Проварювання+сушіння+пропарювання+сушіння+ +плющення (ТМ «Бистров»)	14...16
Замочування+екструдкування (ТМ «Каша Малаша»)	11...12
Замочування+проварювання+вакуумне сушіння (ТМ «Бистров»)	13...16
Розроблений спосіб (гідротермічна обробка з ІнтМО)	8...9

Необхідно відмітити, що в розробленій установці проводиться повна гідротермічна обробка, тобто проварювання та сушіння. При цьому тривалість проварювання та сушіння сировини за способом з використанням ефекту ІнтМО складає 120 хв., а для способів поширених на виробництві, враховуючи тривалість відокремлених від сушіння процесів проварювання (до 60 хв.) та плющення (до 20 хв. із завантаженням та вивантаженням), – не менше 140 хв (окрім екструзійного способу).

Таким чином, розроблено апарат для гідротермічної обробки круп з використанням ефекту ІнтМО з продуктивністю 6 кг/год та енерговитратами  $8,1 \cdot 10^6$  Дж/кг по сушеній продукції, де вихідною сировиною є швидко відновлювані каші.

Випробування дослідного зразка апарата для гідротермічної обробки круп з ІнтМО експериментально підтвердили отримані результати.

Отримана продукція була апробована в якості гарнірів до других блюд: «Каша гречана», «Каша пшоняна», «Каша перлова», «Каша пшенична», та може використовуватись як складова в швидковідновлюваних кашах з однієї крупи або із декількох відразу, з додаванням фруктів, ягід, грибів, прянощів і т.ін. [300].

Наукові розробки підтвержені патентом України на корисну модель №48230 «Установка для гідротермічної обробки та сушіння крупи» (Додаток А.2).

Розроблено проект ТУ У 15.8-01566330-276:2012 «Каші швидковідновлювані» (Додаток Г).

Соціальний ефект практичного впровадження розробленої технології та апарата полягає у розширенні асортименту та можливості використання сушених напівфабрикатів при організації харчування населення як у закладах ресторанного господарства, так і споживачами в домашніх умовах; в ознайомленні студентів ХДУХТ з сучасними досягненнями в науці про сушіння та з основними результатами досліджень за даним науковим напрямком.

#### 5.2.5 Економічний ефект від впровадження у виробництво апарата для гідротермічної обробки круп з використанням ефекту індукованого тепломасообміну

Практична реалізація організаційно-технічного заходу з застосування апарата для виробництва швидковідновлюваних каш з використанням ефекту ІНТМО дає можливість зернопереробним підприємствам ефективно використовувати закони ринку та проводити більш продуктивну, результативну господарську діяльність. Згідно з прийнятими нормами ринкової економіки заходи, що пропонуються, вимагають обґрунтування їх доцільності та оцінки ефективності.



Проблематика виміру, критеріїв та показників ефективності виробництва та інвестицій розробляється сучасними та закордонними вченими. Різноманітні аспекти цього питання знайшли відображення у наукових працях відомих вітчизняних учених – Афанасьєва М.В., Вовчак О.Д. [301, 302].

Один із способів впровадження апарата для отримання швидковідновлюваних каш з використанням ефекту ІнТМО – це заміна даним апаратом апаратів з варки, плющення та сушіння.

Даний спосіб впровадження вимагає капітальних та поточних витрат: одноразових витрат – інвестицій на придбання розробленого апарата, поточних витрат – на його утримання та обслуговування.

У якості оцінних показників ефективності впровадження апарата для отримання швидковідновлюваних каш з використанням ефекту ІнТМО у виробництво обрано показники чистого приведенного доходу (*ЧПД*), терміну окупності (*ТО*) та індексу прибутковості (*ІП*):

$$\text{ЧПД} = \sum_{i=1}^t \text{ГП} - \text{ІС}, \quad (5.22)$$

$$\text{ІП} = \frac{\sum_{i=1}^t \text{ГП}}{\text{ІС}}, \quad (5.23)$$

$$\text{ТО} = \frac{\text{ІС}}{\text{ГПс}}, \quad (5.24)$$

де  $\sum \text{ГП}$  – сума грошового потоку (в теперішній вартості) за весь період експлуатації інвестиційного проекту, тис. грн;

*ІС* – сума інвестиційних коштів, спрямованих на реалізацію інвестиційного проекту, тис. грн;

*ГПс* – середня сума грошового потоку (в теперішній вартості), тис. грн.

Чистий прибуток від реалізації визначили за формулою

$$ЧП = ОР \cdot Ц \cdot T \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + П_{\text{дов}}}\right) \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + П_{\text{пр}}}\right) \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + Н_{\text{пр}}}\right), \quad (5.25)$$

де  $ОР$  – обсяг реалізації за добу, т;

$Ц$  – відпускна ціна одиниці продукції, грн;

$T$  – кількість робочих днів на рік, діб;

$Н_{\text{пр}}$  – середня норма прибутку, част. од.;

$П_{\text{дов}}$  – ставка податку на додану вартість, част. од.;

$П_{\text{пр}}$  – ставка податку на прибуток, част. од.

Чистий прибуток розрахований з використанням вихідних даних виробництва плющеної гречаної швидковідновлюваної каші способом, який включає варку, плющення та сушіння. Будемо вважати, виробнича потужність лінії з виробництва гречаної швидковідновлюваної каші з застосуванням апарата для виробництва швидковідновлюваних каш з використанням ефекту ІнТМО – 100 кг на добу, відпускна ціна 1т – 5000,0 грн., норма прибутку – 10,0%, діюча ставка податку на додану вартість – 20,0%, ставка оподаткування прибутку – 25,0%. (Розрахунок проведено для середнього курсу гривні України по відношенню до долару США – 25,5:1).

За цих вихідних умов чиста виручка від реалізації складе:  $100,0 \cdot 240 \text{ роб.дїб} \cdot 5,0 \cdot 0,833 = 99960,0$  тис. грн; чистий прибуток за норми прибутку 10,0% –  $99960,0 \cdot 0,1 \cdot 0,75 = 7497,0$  тис.грн. Річну суму амортизації визначено виходячи з вартості апарата для виробництва швидковідновлюваних каш з використанням ефекту ІнТМО – 80,0 тис. грн та річної норми амортизації – 24,0% ( $80,0 \cdot 0,24 = 19,2$  тис. грн). Таким чином,  $ГП_1 = 7497,0 + 19,2 = 7516,2$  тис. грн.

Суму поточних витрат на утримання та обслуговування апарата для виробництва швидковідновлюваних каш з використанням ефекту ІнТМО визначено за формулою:

$$ВП_{обл.} = O \cdot k_{обл.} / 100, \quad (5.26)$$

де  $O$  – вартість обладнання, тис. грн;

$k_{обл.}$  – коефіцієнт, який враховує витрати на утримання і поточний ремонт обладнання, %.

Для розробленого апарата  $ВП_1 = 80,0 \cdot 3,5 / 100 = 2,8$  тис. грн.

Виходячи з того, що впровадження апарата для виробництва швидковідновлюваних каш з використанням ефекту ІнТМО потребує порівняно невеликих обсягів капітальних вкладень, вважаємо, що інвестиції в основні виробничі фонди будуть здійснені протягом одного року. Тому розрахунки ефективності зазначеного заходу обмежені одним роком.

$$ЧПД = 7516,2 - 80,0 - 2,8 = 7433,4 \text{ тис. грн.};$$

$$ІП = 74333,4 / 82,8 = 89,78;$$

$$ТО = 82,8 / 13,8 = 6 \text{ міс.}$$

Виходячи з отриманих розрахунків, удосконалення технологічної лінії з виробництва швидковідновлюваних каш шляхом вилучення апаратів для варки, плющення й сушіння та встановлення апарата для виробництва швидковідновлюваних каш з використанням ефекту ІнТМО є ефективним, оскільки чиста теперішня вартість є позитивною; індекс прибутковості значно перевищує 1; термін окупності проекту складає 6 місяців.

Таким чином, економічний ефект розробки досягається за рахунок скорочення кількості використовуваних технологічних операцій, виконання основних операцій в одному апараті і, як наслідок, зменшення металоємності використовуваного устаткування і витрат на оплату праці робітників, і за рахунок скорочення енерговитрат на одиницю продукції більш ніж у 1,3 разу.

## Висновки до розділу 5

1. Визначено вимоги до елементів конструкції апаратів для реалізації ефекту ІнТМО, а саме: конструкцію внутрішнього об'єму термостата (забезпечення наявності щонайменше двох рівноважних станів); конструкцію та фільтраційні властивості обтюратора (забезпечення наявності енергетичного бар'єру); спосіб створення потоку повітря, що рухається відносно зовнішньої поверхні обтюратора, та його параметри (забезпечення наявності флуктуації на границі розділу між внутрішнім та зовнішнім середовищем); спосіб підведення теплоти до внутрішнього середовища термостата (забезпечення термостатування).

2. Розроблені способи технічної реалізації необхідних вимог для організації ефекту ІнТМО в термостаті. Запропоновані концептуальні рішення практичної реалізації апаратів з використанням ефекту ІнТМО для виконання таких технологічних операцій харчової промисловості, як сушіння вологого ККПТ; гідротермічна обробка вологого ККПТ; випарювання або згущення сировини з високим вмістом системної води; ректифікація, перегонка або дистиляція розчинів, суспензій, тощо; охолодження та термостатування.

3. Розроблено спосіб та апарат безперервної дії для гідротермічної обробки круп з використанням ефекту ІнТМО, де кінцевою продукцією є швидковідновлювані каші, що не потребують варіння. Розроблено на основі технологічної схеми виробництва варено-сушених круп і бобових технологічну схему гідротермічної обробки круп, яка спрощена за рахунок уникнення операцій проварювання, плющення та досушування, що досягається шляхом об'єднання процесів проварювання та сушіння в одному апараті безперервної дії з використанням ефекту ІнТМО. Розроблено на основі теоретичних та експериментальних досліджень, проведених в роботі, раціональні режими отримання швидковідновлюваних каш з використанням ІнТМО.

4. Проведено за запропонованими і стандартними рівняннями теплового й масового балансів з урахуванням особливостей організації ефекту ІнтМО розрахунок апарата для гідротермічної обробки круп з його використанням. Розробки підтверджені патентом України на корисну модель «Установка для гідротермічної обробки та сушіння круп». Розроблено проект ТУ У «Каші швидковідновлювані».

5. Доведено, що економічний ефект розробки досягається за рахунок скорочення кількості використовуваних технологічних операцій, виконання основних операцій в одному апараті і, як наслідок, зменшення металоємності використовуваного обладнання і витрат на оплату праці робітників, і за рахунок скорочення енерговитрат на одиницю продукції більш ніж у 1,3 разу.

## РОЗДІЛ 6

### ФУНКЦІОНАЛЬНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ, ОТРИМАНОЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНДУКОВАНОГО ТЕПЛОМАСООБМІНУ

В підрозд. 5.1 наведено концептуальні рішення практичної реалізації апаратів з використанням ефекту ІнТМО для виконання таких технологічних операцій, як: сушіння; гідротермічна обробка; випарювання або згущення; ректифікація, перегонка або дистиляція; охолодження або термостатування.

В роботі проведено дослідження окремих функціонально-технологічних властивостей та показників якості продукції, отриманої в результаті таких технологічних операцій, як сушіння, гідротермічна обробка та випарювання, які проводяться з використанням ІнТМО.

Для виконання даних технологічних операцій створені прототипи термостатів, конструкція яких обумовлена змістом операції, яка виконується. Схематичний вид прототипів апаратів наведений на наступних рисунках роботи: термостат для сушіння – рис. 5.7 *b* та 5.7 *c*; термостат для гідротермічної обробки – рис. 5.13; термостат для випарювання – рис. 5.9.

У відповідності до технологічної операції, яка виконується в термостаті з використанням ефекту ІнТМО, та продукції, що отримується в результаті, досліджувались її показники якості та функціонально-технологічні властивості.

Так результатом гідротермічної обробки круп є швидковідновлювані каші. Для даної продукції досліджувались: гігроскопічні властивості, відновлюваність, мікробіологічні показники, хімічний склад.

Операція випарювання проводилась для отримання концентрату соку чорниці. Для даної продукції досліджували зміну колірнього спектру.

Показники якості та функціонально-технологічні властивості продукції, отриманої сушінням з використанням ефекту ІнТМО, досить широко і повно досліджені та висвітлені в роботах з розробки та дослідження

процесу ЗТП-сушіння [69, 70, 138-145]. В даній роботі проведено дослідження колірних характеристик та вмісту вітаміну С сушеної чорниці. Дані дослідження проводились, виходячи з того, що зневоднення такої термолабільної сировини, як ягоди чорниці, у термостаті нової конструкції, такої як наведено на рис. 5.7 *b*, раніше не проводились.

## **6.1 Функціонально-технологічні властивості та показники якості швидковідновлюваних каш, отриманих з використанням індукованого тепломасообміну**

Швидковідновлювані каші отримані гідротермічною обробкою круп в термостаті з використанням ІнТМО, після відновлення представляють собою густі в міру однорідні каші, які можуть використовуватись як гарнір для других блюд. Органолептичні показники для отриманої продукції визначались відповідно до ДСТУ 1055:2006 «Крупи, що швидко розварюються» [303]. Органолептичні показники, а саме: зовнішній вигляд, колір, смак, запах, задовольняють нормам.

### **6.1.1 Гігроскопічні властивості швидковідновлюваних каш, отриманих в термостаті з використанням ефекту індукованого тепломасообміну**

Здатність напівфабрикатів високого ступеня готовності, якими є швидковідновлювані каші, отримані розробленим способом, не змінювати тривалий час свої властивості, багато в чому визначається їх гігроскопічними властивостями, тобто здатністю віддавати або поглинати пару води з навколишнього середовища. Перебуваючи в атмосфері вологого повітря, сушений продукт може обмінюватися масою із зовнішнім середовищем. Якщо парціальний тиск пари води біля поверхні продукту більше парціального тиску пари в повітрі, то відбувається випар (десорбція), а маса й вологовміст продукту зменшуються, якщо ж співвідношення парціальних

тисків зворотне – то відбувається зволоження продукту (сорбція) – маса й вологовміст продукту збільшуються. При цьому продукт характеризується рівноважним вологовмістом – тиск пари води над поверхнею та в атмосфері вирівнюється. Ці процеси відіграють важливу роль під час зберігання сушеної продукції і ними визначаються умови та терміни зберігання.

Досліджувались швидковідновлювані каші [304-306], отримані гідротермічною обробкою гречаної, пшоняної, ячмінної та пшеничної круп у термостаті з використанням ефекту ІнТМО.

Для вивчення сорбції та визначення рівноважного вологовмісту швидковідновлюваних каш використовували тензометричний метод. Досліджуваний зразок поміщали в ексикатори з фіксованим значенням відносної вологості повітря  $\varphi$  із діапазону від 10 до 90%. Всі ексикатори витримувались за постійної температури навколишнього середовища протягом вимірів (20...23 °С). Тривалість перебування продукту в ексикаторі визначалась досягненням зразком постійної маси. Ізотерми сорбції швидковідновлюваних каш (гречаної, пшоняної, ячмінної, пшеничної) наведені на рис. 6.1.

В діапазоні відносної вологості від 10 до 80% зразки перебувають в області мономолекулярної та полімолекулярної сорбції. При подальшому збільшенні вологості відбувається поглинання вологи мікрокапілярами та набухання зразків. Для зразків швидковідновлюваних каш характер ізотерм не має яскраво вираженої асимптоти паралельної осі вологовмісту. Подальше зволоження таких зразків можливе за безпосереднього зіткнення з рідиною. Отриманий результат вказує на можливість їх тривалого зберігання в полімерній упаковці за відносної вологості не більше 75%, а при відносній вологості більше 75% зберігання можливе лише у паронепроникній тарі. Отримувану продукцію рекомендується зберігати за температури від 0 °С до 25 °С за відносної вологості повітря не більше 75%. Термін зберігання за вказаних умов 12 місяців від дати виготовлення.



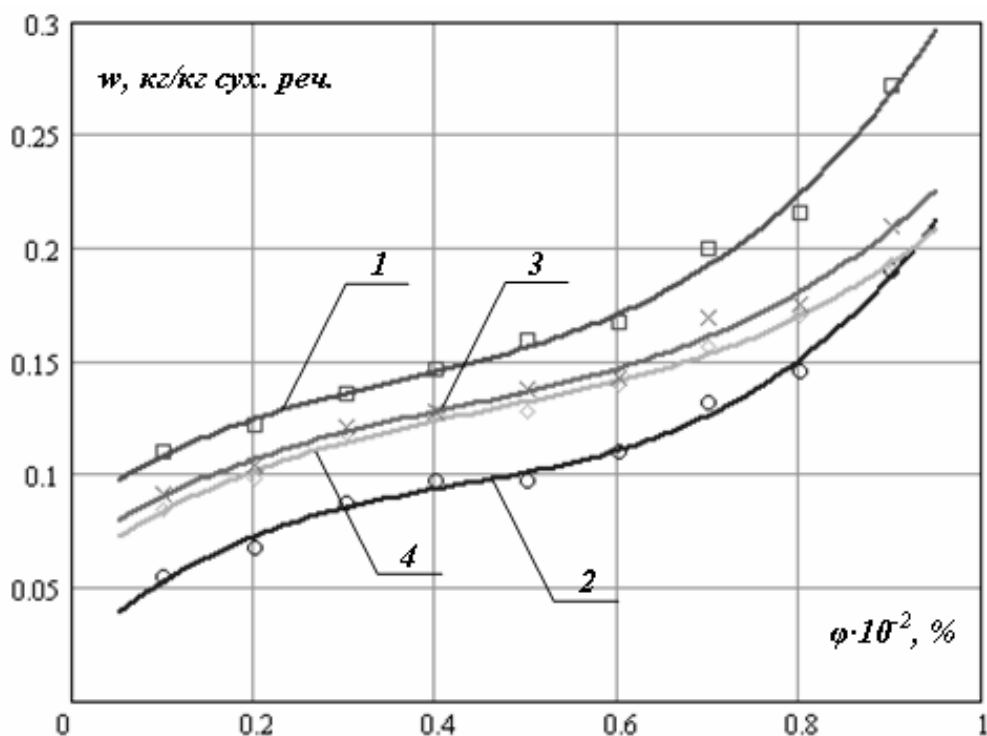


Рисунок 6.1 – Ізотерми сорбції швидковідновлюваних каш, отриманих гідротермічною обробкою круп в термостаті з використанням ефекту ІнТМО: 1 – гречана; 2 – пшоняна; 3 – ячмінна; 4 – пшенична

Ізотерма сорбції для швидковідновлюваної каші із гречаної крупи знаходиться вище ізотерм двох інших досліджуваних зразків, а найнижчою є ізотерма для пшоняної швидковідновлюваної каші. Пояснюється отриманий результат різною пористістю круп.

Пористість досліджувалась шляхом визначення диференціальних функцій розподілу пор за радіусами [305, 307-309]. Дані функції визначались за ізотермами сорбції досліджуваних зразків [307] (швидковідновлюваних каш, отриманих гідротермічною обробкою в термостаті з використанням ефекту ІнТМО гречаної, пшоняної; пшеничної, ячмінної круп) наступним чином.

Апроксимація експериментальних даних, отриманих тензометричним методом для побудови ізотерми сорбції, проводилась функцією виду [307]:

$$\varphi = \frac{w^{A_3}}{A_1 + A_2 w^{A_3}}, \quad (6.1)$$

де  $A_1, A_2, A_3$  – апроксимаційні коефіцієнти;

$w$  – рівноважний вологовміст.

Використання даної апроксимаційної функції дає можливість отримувати диференціальну функцію розподілу пор за радіусами  $f_n(R^*)$ .

Диференціальна функція розподілу пор за радіусами визначається наступним чином:

$$f_n(R^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_R R^*} \exp\left(-\frac{(\ln(R^*) - m_R)^2}{2\sigma_R^2}\right), \quad (6.2)$$

де  $m_R$  та  $\sigma_R$  – параметри логарифмічно нормального розподілу;

$R^*$  – безрозмірний радіус пори,  $R^* = (R - d_0) / d_0$ ;

$R$  – радіус пори, м;

$d_0 = 0,3 \cdot 10^{-9}$  м – радіус молекули води.

Параметри логарифмічно нормального розподілу розраховуються [307] за формулами:

$$m_R = \left(\frac{A_2}{0,433}\right)^{1,247}, \quad (6.3)$$

$$\sigma_R = -\frac{\ln(6,12A_1)}{0,625} \left(\frac{A_3 - 0,957}{0,223}\right)^{-0,6}. \quad (6.4)$$

Диференціальні функції розподілу пор за радіусами, отримані за описаною методикою, наведені на рис. 6.2.

Отримані функції розподілу мають схожий характер та близькі положення максимумів відносно осі, на якій відкладено безрозмірний радіус пор. Відрізняються вони шириною ліній, це свідчить про те, що зразки відрізняються різною відносною кількістю пор різного радіусу.

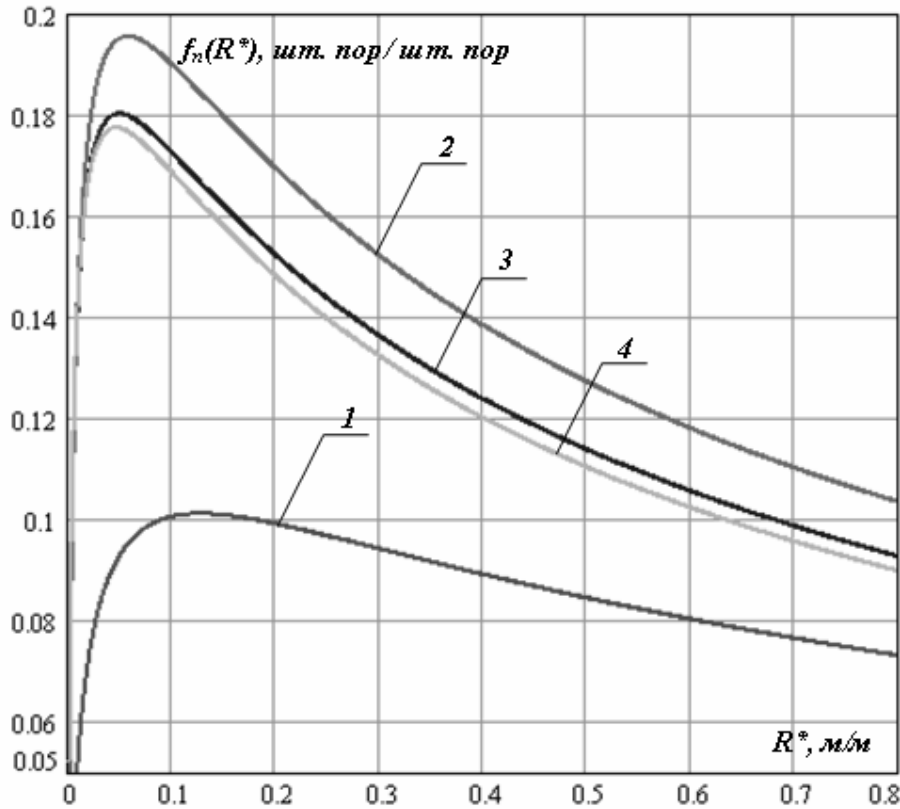


Рисунок 6.2 – Диференціальні функції розподілу пор за радіусами для швидковідновлюваних каш: 1 – гречаної; 2 – пшонаної; 3 – ячмінної; 4 – пшеничної

За отриманими функціями розподілу розраховані середній:

$$\bar{R} = d_0 \left[ 1 + \exp\left(m_R + \sigma_R^2 / 2\right) \right] \quad (6.5)$$

та найбільш ймовірний радіус пор (центр розподілу)

$$R_m = d_0 \left[ 1 + \exp\left(m_R - \sigma_R^2\right) \right], \quad (6.6)$$

значення яких наведені в табл.6.1.

**Таблиця 6.1.**

**Середній та найбільш імовірний радіус пор швидковідновлюваних каш,  
отриманих із різних круп**

Швидковідновлювана каша:	$\bar{R} \cdot 10^7$ , м ( $\delta = 10\%$ )	$R_m \cdot 10^7$ , м ( $\delta = 10\%$ )
гречана	16,0	3,38
пшоняна	6,1	3,17
ячмінна	9,7	3,14
пшенична	9,6	3,15

За тією ж методикою за ізотермами сорбції отримано диференціальні функції розподілу пор за радіусами для сировини, з якої отримували швидковідновлювані каші у термостаті з використанням ефекту ІНТМО.

Диференціальні функції розподілу пор за радіусами для сировини наведені на рис. 6.3, а значення середнього та найбільш імовірного радіусів – в табл. 6.2.

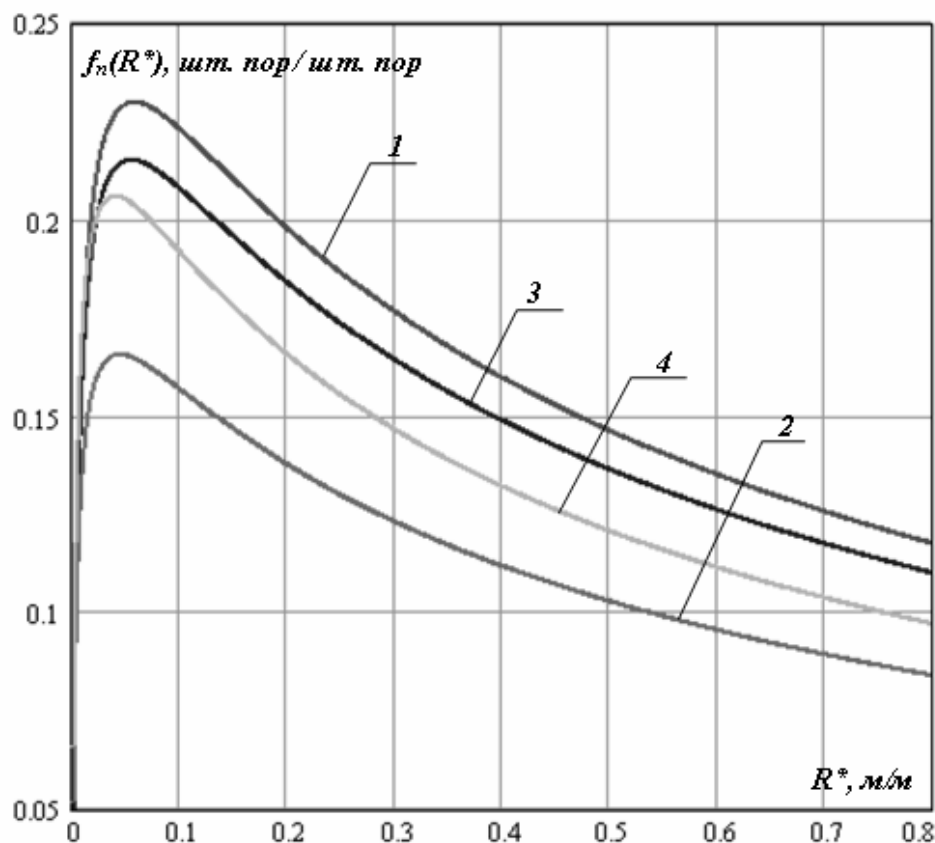
**Таблиця 6.2.**

**Середній та найбільш імовірний радіус різних круп**

Зразок крупи:	$\bar{R} \cdot 10^7$ , м ( $\delta = 10\%$ )	$R_m \cdot 10^7$ , м ( $\delta = 10\%$ )
гречана	12,0	3,08
пшоняна	3,1	3,01
ячмінна	8,4	3,04
пшенична	7,7	3,06

З отриманих результатів видно, що як і у відповідної сировини, у отриманих каш розкид найбільш імовірних радіусів знаходиться в межах похибки, а середній радіус для гречаної каші найбільший ( $16,0 \cdot 10^7$  м), для пшоняної – найменший ( $6,1 \cdot 10^7$  м). Але необхідно відмітити, що після

гідротермічної обробки у термостаті з використанням ефекту ІнтМО середній радіус досліджуваних зразків збільшився по відношенню до сировини (табл. 6.1 та табл. 6.2): для гречаної каші в 1,33 рази; для пшоняної – в 1,97; для ячмінної – в 1,15; для пшеничної – в 1,25 рази.

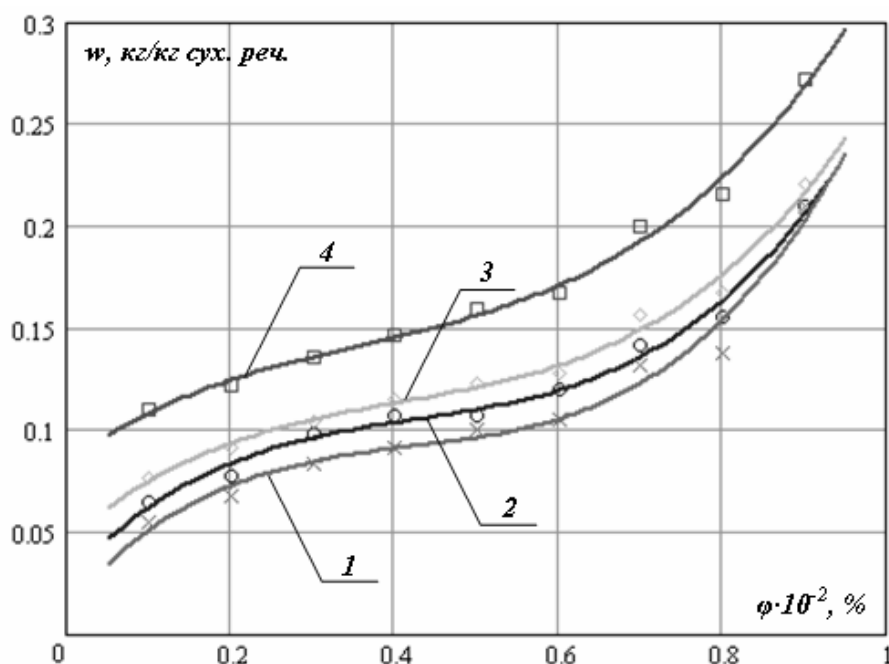


**Рисунок 6.3 – Диференціальні функції розподілу пор за радіусами для круп:  
1 – гречана; 2 – пшоняна; 3 – ячмінна; 4 – пшенична**

Встановлене означає, що під час гідротермічної обробки з використанням ефекту ІнтМО відбувається розвиток пористої структури сировини. Причому розвиток пористості під час обробки з використанням ІнтМО відбувається в більшому ступені, ніж під час обробки з використанням інших способів. Підтверджується це дослідженнями пористості швидковідновлюваної гречаної каші, отриманої різними способами.

При цьому досліджувались швидковідновлювані гречані каші, отримані наступним чином: зразок 1 – екструдуванням гречаної круп (ТМ «Каша

Малаша»); зразок 2 – з попереднім проварюванням, подальшим конвективним сушінням та плющенням (ТМ «Бистров»); зразок 3 – розробленим способом, тобто гідротермічною обробкою крупи з використанням ефекту ІнТМО. В якості контролю використовувалась несмажена гречана крупа. Ізотерми сорбції досліджуваних зразків представлені на рис. 6.4.



**Рисунок 6.4** – Ізотерми сорбції несмаженої гречаної крупи (1) та швидковідновлюваних каш отриманих: 2 – екструдуванням гречаної крупи (зразок 1); 3 – з попереднім проварюванням, подальшим конвективним сушінням та плющенням (зразок 2); 4 – гідротермічною обробкою в термостаті з використанням ефекту ІнТМО (зразок 3)

Диференціальні функції розподілу пор за радіусами для досліджуваних зразків, отримані за ізотермами сорбції, наведені на рис. 6.5.

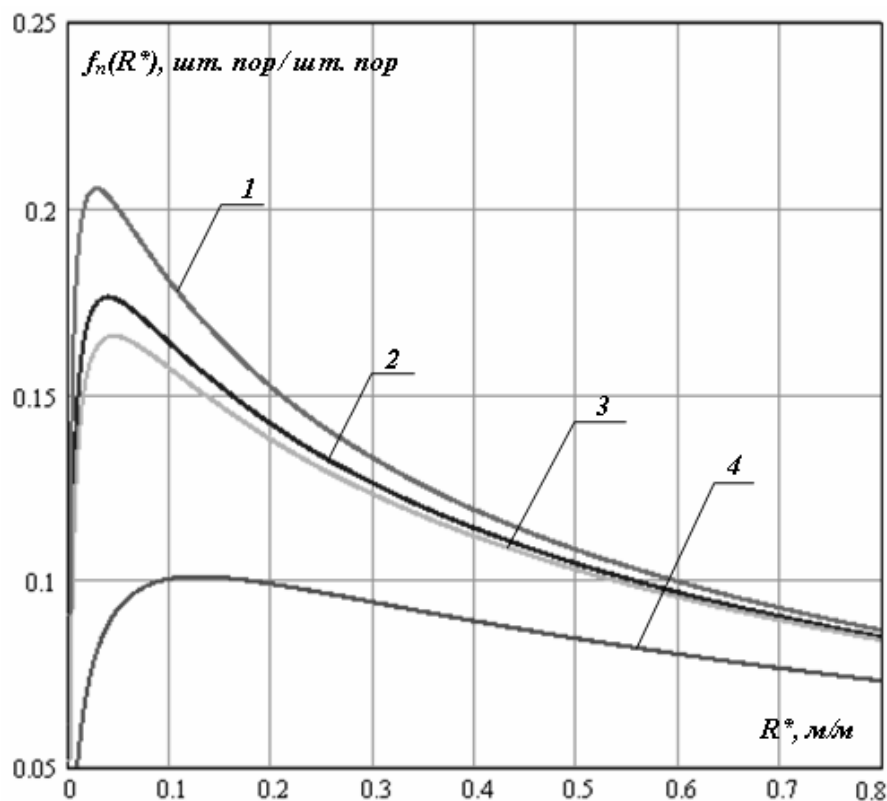
Отримані результати показують, що швидковідновлювана каша, отримана розробленим способом має найширшу функцію розподілу пор за радіусом у порівнянні з іншими зразками, це свідчить про більшу відносну кількість пор з різними радіусами, тобто пориста структура каші найбільш

віддалена від монопористої, що відбивається на її властивостях поглинати вологу.

Таблиця 6.3.

**Середній та найбільш імовірний радіус пор контролю та швидковідновлюваних каш, отриманих різними способами**

Зразок	$\bar{R} \cdot 10^7, \text{ м}$ ( $\delta = 10\%$ )	$R_m \cdot 10^7, \text{ м}$ ( $\delta = 10\%$ )
контроль	12,0	3,08
Замочування+екструдкування (ТМ «Каша Малаша»)	14,0	3,12
Проварювання+сушіння+пропарювання+сушіння+плющення (ТМ «Бистров»)	14,0	3,13
за розробленим способом	16,0	3,38



**Рисунок 6.5 – Диференціальні функції розподілу пор за радіусами для несмаженої гречаної крупи (1) та швидковідновлюваних каш отриманих: 2 – замочуванням та екструдкуванням гречаної крупи (зразок 1); 3 – проварюванням, конвективним сушінням та плющенням (зразок 2); 4 – гідротермічною обробкою в термостаті з ІнТМО (зразок 3)**

Ті ж результати отримані і для середнього радіусу (табл. 6.3) – середній радіус для швидковідновлюваної каші, отриманої розробленим способом, збільшився по відношенню до контролю, який був вихідною сировиною, в 1,33 рази, а для зразків швидковідновлюваних каш, отриманих екструдкуванням гречаної крупи (зразок 1) та проварюванням, наступним зневодненням конвективним способом та плющенням, в 1,16 разу.

Пояснюється отримане особливостями ефекту ІнТМО пов'язаними з розвитком дисипативних структур, виникнення яких супроводжується розвиненням площі випаровування і, як наслідок, збільшенням пористості отримуваної продукції.

Таким чином, гідротермічна обробка круп в термостаті з використанням ефекту ІнТМО, сприяє розвиненню пористості отримуваних із даної сировини швидковідновлюваних каш внаслідок розвитку потужності дисипативних структур під час такої обробки.

### 6.1.2 Відновлюваність швидковідновлюваних каш

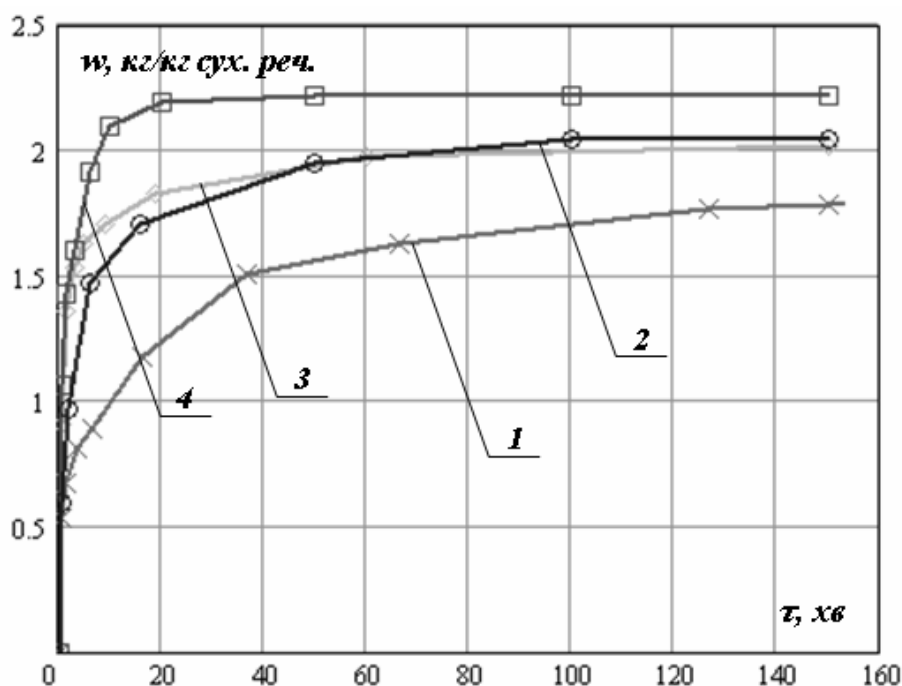
Важливою функціонально-технологічною властивістю швидковідновлюваних каш є їх відновлюваність [304, 305].

Проводились дослідження зразків швидковідновлюваних гречаних каш, отриманих наступним чином: зразок 1 – екструдкуванням гречаної крупи; зразок 2 – з попереднім проварюванням, подальшим конвективним сушінням та плющенням; зразок 3 – розробленим способом, тобто гідротермічною обробкою крупи в термостаті з використанням ефекту ІнТМО. Контролем була несмажена гречана крупа. Кінетика набухання досліджуваних зразків, представлена на рис. 6.6, визначалась об'ємним методом на пристрої Догадкіна. В якості змочуючої рідини використовувалась вода з температурою 20...23 °С. Вимірювання



закінчувались за досягнення зразком постійного вологовмісту, який вважали кінцевим.

Кінетики набухання мають однаковий характер, але різний кінцевий вологовміст. Обумовлено отримане розвитком пористості отриманого продукту в процесі гідротермічної обробки сировини, причому за використання традиційної технології в меншому, а за використання ефекту ІнТМО під час гідротермічної обробки в термостаті – в більшому ступені.

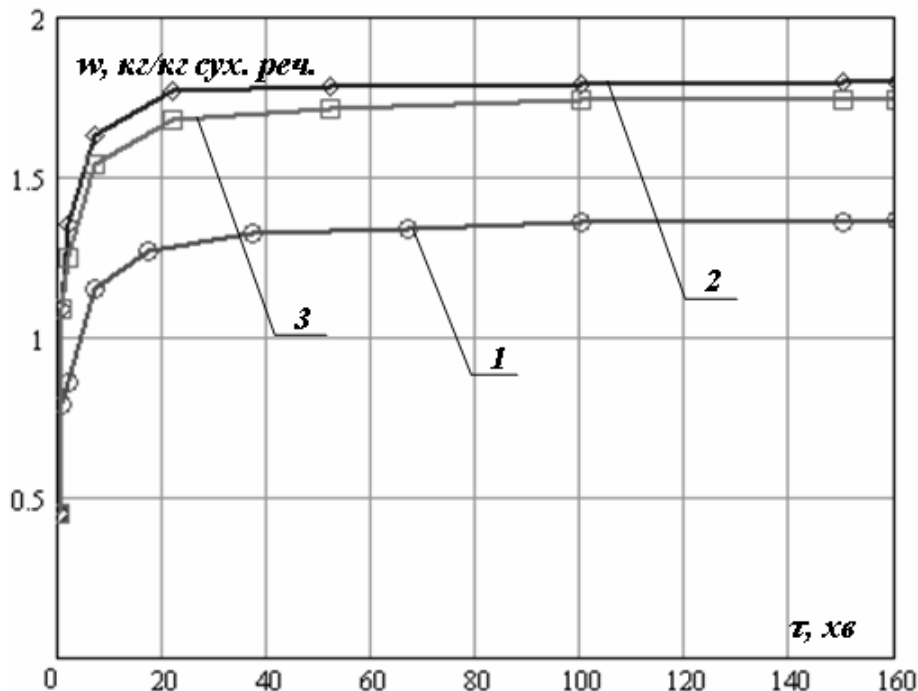


**Рисунок 6.6** – Кінетика набухання несмаженої гречаної крупи (1) та швидковідновлюваних каш отриманих: 2 – екструдуюванням гречаної крупи (зразок 1); 3 – проварюванням, конвективним сушінням та плющенням (зразок 2); 4 – гідротермічною обробкою в термостаті з використанням ефекту ІнТМО (зразок 3)

З наведених кінетик набухання видно, що горизонтальна ділянка, ділянка кривої паралельна осі, на якій відкладено тривалість обводнювання, починається для різних каш за різної тривалості набухання. Вихід кривої на горизонтальну ділянку відповідає тривалості обводнювання, за якої зразок досягає кінцевого вологовмісту. Для швидковідновлюваних каш, отриманих екструдуюванням (2) та проварюванням з наступним зневодненням

конвективним способом (3), тривалість набухання до кінцевого вологовмісту знаходиться в діапазоні від 40 до 50 хв., для швидковідновлюваної каші, отриманої розробленим способом – 20 хв. Таким чином, тривалість відновлення швидковідновлюваної каші, отриманої гідротермічною обробкою гречаної крупи в термостаті з використанням ефекту ІнТМО, в 2...2,5 разу менша, ніж для швидковідновлюваних каш, отриманих за традиційною технологією, що є більш прийнятною функціонально-технологічною властивістю отримуваної продукції.

Дослідженнями кінетики набухання швидковідновлюваних каш, отриманих гідротермічною обробкою в термостаті з використанням ефекту ІнТМО пшоняної, ячмінної та пшеничної круп, визначено (рис. 6.7), що тривалість досягнення даними зразками кінцевого вологовмісту за температури змочуючої рідини 20...23 °С складає, як і для гречаної каші, отриманої розробленим способом – 20 хв.



**Рисунок 6.7 – Кінетика набухання швидковідновлюваних каш, отриманих гідротермічною обробкою круп в термостаті з використанням ефекту ІнТМО: 1 – пшоняна; 2 – ячмінна; 3 – пшенична**

Необхідно відмітити, що кінетика набухання отримувалась за температури води 20...23 °С, а оскільки під час приготування швидковідновлюваних каш використовується окріп, тобто вода з температурою 85...95 °С, то тривалість набухання зменшується в 4...5 разів [310, 311]. Звідси тривалість набухання швидковідновлюваних каш, отриманих екструдуванням (зразок 1) та проварюванням з наступним зневодненням конвективним способом (зразок 2), за умови використання в якості змочуючої рідини води з температурою 85...95 °С, скорочується до 7...10 хв., а каш, отриманих розробленим способом – до 3...5 хв.

Таким чином, встановлено, швидковідновлювані каші, отримані гідротермічною обробкою круп в термостаті з використанням ефекту ІнтМО, поглинають вологу під час приготування в 2...2,5 разу швидше, ніж швидковідновлювані каші, отримані традиційними способами, що підвищує їх функціонально-технологічні властивості. Визначено, що раціональною тривалістю набухання розроблених каш є тривалість, яка дорівнює 5 хв. за умови використання води з температурою 85...95 °С.

### 6.1.3 Мікробіологічні показники та вміст токсичних елементів і радіонуклідів швидковідновлюваних каш, отриманих в з використанням індукованого тепломасообміну

Внесення до складу швидковідновлюваних каш, отриманих розробленим способом гідротермічної обробки в термостаті з використанням ефекту ІнтМО, токсичних елементів та радіонуклідів – виключене. Забруднення можливе під час операцій підготовки сировини до гідротермічної обробки, таких наприклад, як мийка. Під час гідротермічної обробки круп з використанням ІнтМО забруднення можливе лише водою для замочування сировини. Але даних потенціальних можливостей забруднення уникають шляхом використання питної води, якість якої повинна відповідати Державним санітарним нормам та правилам «Гігієнічні вимоги до води

питної, призначеної для споживання людиною» (ДСанПіН 2.2.4-171-10) [312]. Таким чином, забруднення можливе лише на етапі вирощування сировини, що контролюється безпосередньо під час надходження сировини на виробництво.

З метою доведення вищевикладеного, проведено дослідження вмісту токсичних елементів та радіонуклідів у швидковідновлюваних кашах [304], отриманих гідротермічною обробкою круп в термостаті з використанням ефекту ІнТМО, на базі лабораторії Харківського центру «Облдержродючість» атомно-абсорбційним методом за Державними гігієнічними нормативами «Допустимі рівні вмісту радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  у продуктах харчування та питній воді» [312-314]. Отримані результати наведені в табл. 6.4.

Таблиця 6.4

**Вміст токсичних елементів та радіонуклідів у розроблених швидковідновлюваних кашах**

Швидковідновлювана каша:	Pb, мг/кг	As, мг/кг	Cd, мг/кг	Hg, мг/кг	Cu, мг/кг	Zn, мг/кг	Cs, Бк/кг	Sr, Бк/кг
гречана	0,11	0,05	0,01	0,01	8,0	15,0	5	6
пшоняна	0,12	0,06	0,01	0,01	3,3	13,3	3	5
пшенична	0,12	0,05	0,01	0,01	2,0	15,9	6	6
Допустимі рівні, не більше	0,50	0,20	0,10	0,03	10,0	50,0	80	140

В результаті дослідження рівня безпеки швидковідновлюваних каш, отриманих гідротермічною обробкою круп з використанням ІнТМО, встановлено, що розроблена продукція містить незначну кількість токсичних елементів (свинцю, кадмію, миш'яку, ртуті, міді та цинку) та радіонуклідів (Cs, Sr), яка не перевищує нормативи, встановлені «Медико-біологічним вимогам і санітарним нормам якості продовольчої сировини та харчових продуктів Мінздраву України» [315].

Тепловий вплив в процесі гідротермічної обробки круп в термостаті практично повністю знищує мікрофлору, наявну в сировині. У зв'язку з цим виконання вимог інструкцій із санітарної обробки технологічного обладнання, сам процес гідротермічної обробки та особливості обладнання, яке використовується під час реалізації ефекту ІнтМО (термостат), виключають можливість привнесення мікрофлори ззовні.

Мікробіологічні показники швидковідновлюваних каш, отриманих гідротермічною обробкою круп в термостаті з використанням ефекту ІнтМО, визначались відповідно до Державних санітарних норм та правил «Медичні вимоги до якості та безпечності харчових продуктів та продовольчої сировини». [314]. Отримані результати наведені в табл. 6.5.

Таблиця 6.5

**Мікробіологічні показники розроблених швидковідновлюваних каш**

Швидко- відновлювана каша:	Кількість мезофільних аеробних та факультативно анаеробних мікроорганізмів, КУО/1г	Маса продукту, в якій не допускається, г			Плісняви, КУО/1г
		БГКП в 0,01 г	Патогенні мікроорганізми (в т.ч. сальмонели) в 25 г	<i>V.cereus</i> в 0,1 г	
гречана	$1,1 \cdot 10^3$	відсутні	відсутні	відсутні	<10
пшоняна	$1,3 \cdot 10^3$	відсутні	відсутні	відсутні	<10
пшенична	$1,2 \cdot 10^3$	відсутні	відсутні	відсутні	<10
Допустимі рівні, не більше	$5 \cdot 10^3$	не доп.	не доп.	не доп.	50

З таблиці видно, що основні мікробіологічні показники отримуваної продукції не перевищують встановлені для даної групи товарів нормативи.

Дослідженнями мікробіологічних показників після рекомендованих 12 міс. зберігання за температури від 0 до 25 °С та відносної вологості менше 75% встановлено, що вони не перевищують допустимих рівнів для даної групи товарів.

## **6.2. Колірні характеристики, вміст вітаміну С та мікробіологічні показники сушеної чорниці, отриманої в термостаті з використанням ефекту індукованого тепломасообміну**

Колір є одним з найважливіших критеріїв якості продуктів харчування та дотримання технологічної дисципліни під час переробки натурального продукту. Він є чутливим до змін технологій отримання, умов зберігання сировини або кінцевого продукту. Крім цього колір забезпечує не тільки зовнішню привабливість харчових продуктів, але і впливає на смакове сприйняття їжі, апетит [316]. Останнім часом колориметрія, як наука про спосіб вимірювання кольору, привернула до себе велику увагу. Колір харчових продуктів, у своїй звичній інтерпретації, визначається, як суб'єктивна оцінка дії електромагнітного випромінювання видимої області на зоровий апарат людини. В той же час колір, визначений сенсорним шляхом, відноситься до органолептичних характеристик, що включаються до ДСТУ, ТУ, ТІ та інших нормативних документів [317]. На даний час відомо багато способів представлення кольору, так званих колірних моделей, до них відносяться системи RGB, XYZ, Lab та ін. У даних колориметричних дослідженнях була використана методика, що базується на використанні адитивної колориметричної системи XYZ, запропонованої Міжнародною комісією по освітленню (МКО).

Колориметрична модель XYZ розроблена відповідно до концепції стандартного спостерігача, яка в свою чергу базується на моделі сприйняття кольору паличками та колбочками ока людини [318]. Згідно з системою XYZ

кожен колір може бути представлений у вигляді суми трьох лінійно незалежних (основних) кольорів:

$$F = X \cdot x + Y \cdot y + Z \cdot z, \quad (6.7)$$

де  $X, Y, Z$  – лінійно незалежні кольори;

$x, y, z$  – координати кольору.

Таким чином, колір є тривимірною величиною і характеризується трьома координатами, які виражають міру основних кольорів. Будучи віднесені до стандартного спостерігача, координати кольору описують фізичний аспект кольору, не враховуючи зміну сприйняття кольору оком при зміні умов спостерігання.

У процесі сушіння чорниці, як і в процесі будь-якого іншого складного технологічного процесу переробки харчової сировини, відбувається зміна кольору. Як відомо колір чорниці забезпечують фарбувальні пігменти – антоціани. Молекули фарбника даного класу відносяться до флавоноїдів. Антоціани мають позитивний заряд, що обумовлює їх чутливість до впливу рН середовища і варіювання кольору від рожево-червоного до фіолетового кольору [319]. Крім того, під час теплової обробки антоціанів, як і більшості природних харчових фарбників: каротиноїдів, хлорофілів, фенольних сполук, також відбувається зміна забарвлення. У зв'язку з цим, в процесі переробки плодово-ягідної сировини, є важливим обрати такі режими за яких відбувається мінімальна зміна кольору кінцевого продукту переробки.

Сушіння чорниці було здійснено у термостаті з використанням ефекту ІНТМО, принципова схема якого наведена на рис. 5.7 *b*. Як відмічено вище, в термостаті такої конструкції зі штучно створеним обтюратором сушіння раніше не проводилось. Особливість організації процесу зневоднення в такому термостаті полягає у тому, що подрібнена сировина (тут чорниця) розміщується в термостаті, при цьому сушіння проводиться без будь-яких добавок або попередньої підготовки (окрім подрібнення).

Під час сушіння на колір сировини впливають два взаємозв'язані чинники: температурний та часовий. У зв'язку з цим процес сушіння у термостаті з використанням ІнТМО був проведений за різної температури термостата і, як наслідок, мав різну тривалість обробки. Зразки зневоднювались за температури термостата, °С: 50, 60, 70, 80.

Визначення колірних характеристик чорниці було здійснено на основі результатів спектрофотометричних досліджень зразків за допомогою фотометра КФК-3. Оскільки одержуваний сушений напівфабрикат не являється однорідним, а являє собою дисперсну систему, в якій у якості дисперсної фази виступають шкірка і кісточки, то доцільно проводити спектрофотометричне дослідження зразків сушеної чорниці приготованих наступним чином: 2 г порошку сушеної чорниці заливали 10 мл дистильованої води і витримували протягом 30 хв. за кімнатної температури. Як контроль виступав зразок, в якому 20 г подрібненої чорниці заливали 82 мл дистильованої води і витримували протягом 30 хв. за тих же умов. При цьому кількість сухих речовин була такою ж, як і кількість сухих речовин дослідних зразків.

Основні відмінності у спектрах пропускання контрольного та дослідних зразків лежать в області 550...650 нм, однак необхідно врахувати чутливість людського ока до різних кольорів.

Як відмічено вище, для вираження кольору, згідно з колориметричною системою  $XYZ$ , використовують координати кольору  $(X, Y, Z)$ , крім цього існують такі колірні характеристики, як колірний тон  $(\lambda)$  та колориметрична чистота кольору  $(p_c)$ , які однозначно визначають кольоровість і володіють більшою наочністю та інформативністю.

Для знаходження колірних параметрів був використаний метод зважених ординат і колірний графік [320]. За даними спектральних залежностей із застосуванням методу зважених ординат був здійснений розрахунок колірних координат згідно з наступним виразом:



$$\begin{aligned}
 X &= \sum \bar{x}(\lambda)\tau(\lambda)I_\lambda, \\
 Y &= \sum \bar{y}(\lambda)\tau(\lambda)I_\lambda, \\
 Z &= \sum \bar{z}(\lambda)\tau(\lambda)I_\lambda,
 \end{aligned}
 \tag{6.8}$$

де  $\tau(\lambda)$  – спектральний коефіцієнт пропускання зразка;

$\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  – функції зсуву;

$I_\lambda$  – спектральна густина випромінювання джерела;

$X, Y, Z$  – координати кольору.

Для кожного зразка по отриманим координатам кольору були розраховані триколірні коефіцієнти наступним чином:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}, \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z}.
 \tag{6.9}$$

Останні дають можливість нанести кольоровість розрахованих зразків на площину колірного графіка і визначити колірні характеристики.

Колірний графік є трикутником, у вершинах якого розташовані одиничні кольори  $XYZ$ , у центрі тяжіння трикутника знаходиться білий колір. На площину графіка нанесена крива колірності монохроматичного випромінювання. На перетині кривої спектральних тонів і прямої, проведеної через точку білого кольору і через точку нанесеної колірності знаходиться кольоровий тон. Розрахунок колориметричної чистоти здійснювали наступним чином:

$$p_c = \frac{y_M}{y_N} \cdot \frac{y_N - y_W}{y_M - y_W},
 \tag{6.10}$$

де  $y_M$  – триколірний коефіцієнт точки перетину прямої проведеної через точку білого кольору та точку розрахованої колірності з кривою спектральних тонів;

$y_N$  – триколірний коефіцієнт розрахованого зразка;

$y_W$  – триколірний коефіцієнт білого кольору.

Для здійснення колориметричних розрахунків був використаний пакет програм MathCad [321]. Програми для здійснення розрахунку наведені в додатках (Додаток Б.3)

Результати розрахунку колірних параметрів наведено в табл. 6.6.

Таблиця 6.6

## Колірні параметри, координати кольору зразків

Зразок, №	Координати кольору			Колірний тон, нм	Чистота кольору
	X	Y	Z		
Контроль	5,791	4,478	4,447	498	0,15
1 (80 °C)	5,095	4,069	4,411	502	0,12
2 (70 °C)	5,248	4,064	4,358	500	0,14
3 (60 °C)	4,855	3,929	4,401	504	0,11
4 (50 °C)	4,215	3,565	4,444	537	0,07
конвективний спосіб (70 °C)	4,120	4,398	4,400	530	0,06

Із даних таблиці випливає, що в процесі сушіння чорниці в усіх зразках відбувається зміна кольору, на що вказує відмінність колірних параметрів дослідних зразків від контролю. При цьому, колірний тон та колориметрична чистота кольору контрольного зразка та зразка № 2 найбільш схожі та характеризуються додатковим кольоровим тоном, який належить до голубої області видимого спектру електромагнітного випромінювання. Також слід зазначити, що вагомі зміни колориметричних характеристик, в порівнянні з контролем, відбуваються у зразку № 4, тобто у випадку сушіння сировини за

температури термостата 50 °С. У даному випадку зразок № 4 має додатковий кольоровий тон, який належить до інтервалу зеленого кольору оптичного випромінювання.

При зміні температури термостата відносно 70 °С у напрямку збільшення до 80 °С (зразок № 1) та зменшення до 60 °С (зразок № 3) спостерігається тенденція до зменшення величини колориметричної чистоти відносно контрольного зразка. У цьому ж випадку кольоровий тон ( $\lambda'$ ) дослідних зразків зміщується в зелену область.

На підставі результатів колориметричних розрахунків встановлено, що температура термостата 70 °С, за якої проводилось сушіння чорниці в термостаті з використанням ефекту ІнтМО, є найбільш раціональною серед досліджуваних з точки зору збереження кольору отриманої в процесі переробки сушеної продукції. Таким чином, раціональним з точки зору збереження кольору є діапазон температур термостата від 65 до 75 °С.

Внаслідок подовження тривалості процесу сушіння через зниження температури термостата до 50 °С зміни кольорових параметрів зразка № 4 відносно контролю ймовірно пов'язані з процесом окислення антоціанів.

Іншим індикатором теплової та окислювальної дії під час обробки рослинної сировини є вміст вітаміну С. При цьому досліджувався порошок із чорниці отриманий сушінням в термостаті нової конструкції зі штучно створеним обтюратором та за умови його сушіння конвективним способом. Температура термостата під час отримання порошків дорівнювала 70 та 50 °С, для конвективного сушіння використовувались температури сушильного агента, які мали такі ж значення. Як контроль використовувались подрібнені ягоди чорниці з яких отримували досліджувані зразки, вміст сухих речовин яких був таким же як і у досліджуваних порошків.

Вміст вітаміну С визначали відповідно до ДСТ 24556-89 «Продукти переробки плодів та овочів. Методи визначення вітаміну С» [322]. Отримані результати наведені в табл. 6.7.

З таблиці видно, що втрати вітаміну С по відношенню до вихідної сировини менші для зразка, отриманого сушінням в термостаті за температури 70 °С, і складають 15%, що майже в 2,3 разу менше у порівнянні із зразком отриманим за умови конвективного сушіння за тієї ж температури. По мірі зменшення температури термостата (сушіння в термостаті з використанням ефекту ІНТМО) та температури сушильного агента (конвективне сушіння) різниця втрат вітаміну С між способами отримання порошків зменшується, через збільшення тривалості процесу.

Таблиця 6.7

**Вміст вітаміну С в сушеній чорниці та контролі**

Спосіб сушіння:	Вміст вітаміну С, мг% на 100 г сух. реч. ( $\delta = 7\%$ )	Втрати, %
в термостаті з ІНТМО (50 °С)	171	39
Конвективне (50 °С)	157	44
в термостаті з ІНТМО (70 °С)	238	15
Конвективне (70 °С)	179	34
Контроль	280	–

Мікробіологічні дослідження проводились для сушеної чорниці та сушеної чорної смородини, отриманих сушінням в термостаті нової конструкції зі штучно створеним обтюратором. Основні мікробіологічні показники даної сушеної продукції, які визначались відповідно до санітарних правил та норм 2.3.2.560-96 «Гігієнічні вимоги до якості та безпечності продовольчої сировини та харчових продуктів» та наведені в табл. 6.8, не перевищують встановлені для даної групи товарів нормативи.

Дослідження мікробіологічних показників після рекомендованих 12 міс. зберігання за температури від 0 до 25 °С та відносної вологості менше

75% доводять, що вони не перевищують допустимих рівнів для даної групи товарів.

Таблиця 6.8

## Мікробіологічні показники сушеної продукції

Сушена продукція	Кількість мезофільних аеробних та факультативно анаеробних мікроорганізмів, КУО/1г	Маса продукту, в якій не допускається, г		Плісняви, КУО/1г
		БГКП в 0,1 г	Патогенні мікроорганізми (в т.ч. сальмонели) в 25 г	
Порошок із ягід чорної смородини	–	не виявл.	не виявл.	$(0,5...1) \cdot 10^2$
Порошок із ягід чорниці	–	не виявл.	не виявл.	$(0,4...1) \cdot 10^2$
Норма	не нормується	не доп.	не доп.	500

Необхідно відмітити, що в роботах з розробки раціональних режимів ЗТП-сушіння (окремого випадку ІнТМО) плодово-ягідної сировини з високим вологовмістом встановлено: зневоднення такої сировини можливе лише за умови внесення в неї добавок (крохмаль, метилцелюлоза) з наступним вспінюванням. Таким чином, перевагами продукції, що отримується у термостаті нової конструкції зі штучно створеним обтюратором, над продукцією, отриманою раніше ЗТП-сушінням, є відсутність спеціальної попередньої підготовки з внесенням добавок.

### 6.3 Спектрофотометричні дослідження концентрату соку чорниці, отриманого випарюванням в термостаті з використанням індукованого тепломасообміну

Однією із складових оцінки якості розчину після випарювання [323-325] у харчовій промисловості є зміна його колірних характеристик порівняно з вихідними колірними характеристиками використовуваної сировини. Об'єктивною оцінкою кольору служить здатність матеріалу відбивати або пропускати світлові хвилі видимого діапазону довжин хвиль.

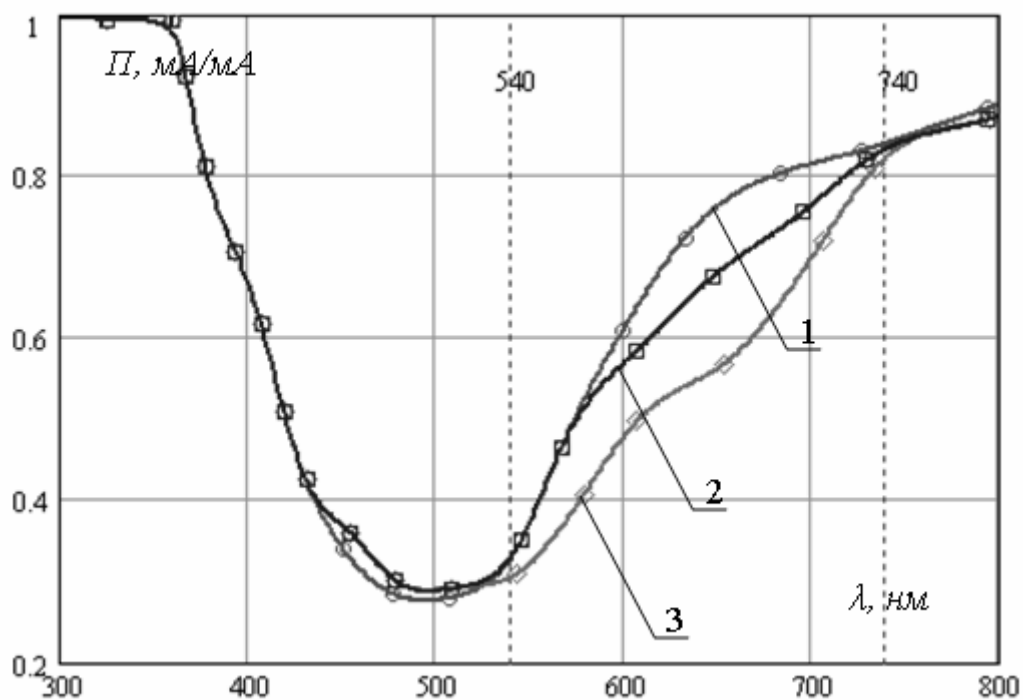
Предметом дослідження був сік чорниці, який вміщує велику кількість фенольних сполук, зокрема антоціанів, вміст яких обумовлює його колірні властивості.

Досліджувався сік чорниці після його випарювання у термостаті (рис. 5.9) з використанням ефекту ІнтМО за атмосферного тиску та температури термостата 105...108 °С та сік чорниці після випарювання у випарному апараті за зниженого тиску (0,7...0,8 атм) та температури 90...95 °С. Випарювання проводили як за першого способу, так і за другого до вмісту сахарози у концентраті – 30 °Brix (30 г сахарози на 100 г рідини). Вміст сахарози визначався з використанням рефрактометра. Як контроль використовували вихідний розчин – свіжевіджаний сік чорниці після фільтрування. Концентрати соку чорниці перед проведенням досліджень доводили шляхом додавання дистильованої води до вмісту сухих речовин, який відповідає вмісту сухих речовин у контролі, тобто у вихідному розчині.

Дослідження змін кольору концентратів соку чорниці у порівнянні з вихідною сировиною проводили шляхом порівняння коефіцієнтів пропускання кожного із досліджуваних зразків. Коефіцієнт пропускання визначався на спектрофотометрі для довжин хвиль, які змінювалися дискретно від 310 до 800 нм.

З наведених на рис. 6.8 залежностей коефіцієнту пропускання від довжини хвилі світла, що проходить крізь розчин, слідує, що відмінності від

контролю для досліджуваних зразків спостерігаються за довжин хвилі із діапазону від 550 до 740 *нм*. Отримане свідчить про те, що зміна кольору отримуваної продукції відбувається через збільшення кількості кольорів, які відповідають даному інтервалу довжин хвиль.



**Рисунок 6.8** – Коефіцієнт пропускання за різної довжини хвилі для контролю (1) та концентратів соку чорниці, отриманих випарюванням до 30 °Вrix: 2 – у термостаті з використанням ефекту ІнтМО за температури термостата 105...108 °С; 3 – у випарному апараті за температури 90...95 °С

Розрахунок площі під спектром в даному діапазоні довжин хвиль (від 550 до 740 *нм*) для кожного із зразків та контролю, яка обчислювалась як визначений інтеграл від апроксимаційної функції у відповідних границях, показує, що площа під спектром для зразка, отриманого випарюванням у термостаті з використанням ефекту ІнтМО за температури термостата 105...108 °С менша за площу під спектром контрольного зразка на 6,5%, а площа під спектром від зразка, отриманого випарюванням у випарному апараті за температури 90...95 °С – на 18%.

Антоціани, які містяться в соку чорниці, істотно піддаються ферментативному окислюванню [326, 327]. Таким чином, зміни кольору під час випарювання залежать від тривалості процесу та від температурного впливу на термолабільні речовини в розчині при цьому.

Першою перевагою способу випарювання у термостаті з використанням ефекту ІнТМО, яка пояснює менші зміни у коефіцієнті пропускання отриманого концентрату, є обмежений доступ кисню повітря до сировини у термостаті, що сприяє зменшенню впливу окислення на вміст антоціанів і таким чином сприяє збереженню вихідних властивостей сировини.

Інша перевага витікає з того, що під час випарювання вихідного розчину у випарному апараті за зниженого тиску температура розчину відповідно дорівнює – 90...95 °С. Під час випарювання вихідного розчину в термостаті з використанням ефекту ІнТМО за температури термостата 105...108 °С температура розчину не перевищує 83...85 °С (підрозд. «3.3.1 Дослідження характеру ефекту ІнТМО за температури термостата більшої за температуру кипіння рідини»). При цьому тривалість процесу, як за першого способу, так і за другого відрізняється не більше ніж на 10% від загальної.

Таким чином, оскільки цінність концентрату у даному випадку визначається збереженням вихідних колірних властивостей сировини, то більш прийнятним є зразок, отриманий випарюванням у термостаті з використанням ефекту ІнТМО.

Необхідно відмітити, що зазвичай у харчоконцентратному виробництві під час отримання концентратів соків випарюванням, процес випарювання проводять за тиску менше атмосферного: так для того, щоб кипіння відбувалось за температури 83...85 °С, тиск повинен дорівнювати 0,5...0,6 *атм*. Забезпечення таких умов потребують ускладнення випарного обладнання та додаткових енерговитрат. Очевидною перевагою випарювання у термостаті з використанням ефекту ІнТМО є те, що випарювання за тих же температур (83...85 °С) відбувається за атмосферного тиску.



#### 6.4 Впровадження та апробація результатів науково-дослідної роботи

У даному підрозділі наведено впровадження та оприлюднення результатів науково-дослідної роботи.

В табл. 6.9 представлені дані щодо наукової продукції та оприлюднення результатів наукового дослідження.

**Таблиця 6.9**

**Дані щодо наукової продукції та оприлюднення результатів наукового дослідження**

Найменування показника	Од. виміру	Значення
Монографії, які опубліковано за темою роботи	од.	3
обсяг	друк. арк.	26,1
Статті в журналах які опубліковано за темою роботи, усього	од.	31
у т. ч. у вітчизняних виданнях	од.	30
обсяг	друк. арк.	13,0
у виданнях, які включено до міжнародних наукометричних баз	од.	8
обсяг	друк. арк.	5,0
у наукових періодичних виданнях інших держав	од.	1
обсяг	друк, арк	0,7
h-індекс (за google scholar)	од.	5
Тези доповідей, які опубліковано за темою роботи, усього	од.	19
у т. ч. у вітчизняних виданнях	од.	14
обсяг	друк. арк.	1,4
в іноземних виданнях	од.	5
обсяг	друк. арк.	0,6
Участь у наукових конференціях, усього	од.	19
у т. ч. у міжнародних	од.	14

Результати роботи увійшли у 3 монографії: «Сушіння плодово-ягідної сировини способом змішаного теплопідводу зі штучним пороутворенням»; «Вода в пищевых продуктах и для пищевых продуктов»; «Гідротермічна обробка круп із використанням принципів сушіння змішаним теплопідводом».

За результатами роботи опубліковано 31 статтю, серед яких 27 – у наукових фахових виданнях України (з них 5 – у виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз), 1 – у науковому періодичному виданні іншої держави з напрямку, із якого підготовлено дисертацію, та 3 статті у виданнях України, що включені до міжнародних наукометричних баз. Експериментальні та теоретичні нароби доповідались та були оприлюднені на 19 конференціях міжнародного та всеукраїнського рівня.

Практична значимість роботи відображена в табл. 6.10

**Таблиця 6.10**

**Результати роботи за напрямком наукового дослідження**

Показник	Од. виміру	Значення
Отримано охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності	од.	2
Захищено дисертацій на здобуття наукового ступеня к.т.н. у рамках науково-практичного напрямку	од.	1
Виконано науково-дослідних робіт у рамках науково-практичного напрямку, усього	од.	5
на суму (всього/за темою)	тис. грн	312,8/96,6
у т. ч. - держбюджетні	од.	1
на суму (всього/за темою)	тис. грн	270,3/47,6
у т. ч. - бюджетні	од.	2
у т. ч. - господарстві	од.	2
на суму	тис. грн	49,0

Результати роботи входять до звітів з бюджетних тем: «Наукові обґрунтування енергоефективних процесів харчової промисловості»; «Удосконалення фізичних методів аналізу технологій та процесів харчових виробництв».

Підрозділи «3.2.1 Обґрунтування визначення «системна вода»», «3.2.2 Дослідження системної води харчових систем низькотемпературним калориметричним методом», «3.2.4 Дослідження системної води крохмальутримуючих харчових систем методом ЕПР-спінових міток», «4.2 Математична модель розвитку потужності дисипативних структур під час ІнтМО» складають 25 % від держбюджетної теми «Дослідження стану та структури вологи в харчових продуктах методами ЯМР та ЕПР-спектроскопії».

Підрозділ «5.2 Розробка обладнання для виробництва швидковідновлюваних каш з використанням ефекту ІнтМО» використаний під час виконання госпдоговірних тем: «Аналіз енергоефективності механічних та теплових процесів під час переробки сільськогосподарської сировини»; «Розробка раціональних режимів гідротермічної обробки рослинної сировини способом з використанням індукованого тепломасообміну».

Результати отримані в роботі впроваджені на ТОВ «Терра» (акт від 13.02.2011 р., м. Первомайський, Харківська обл., Додаток Д.1), ТОВ «Спільне україно-німецьке підприємство «Злаки» (акт від 13.09.2011 р., м. Полтава, Додаток Д.2) та ПСП ім. Т.Г. Шевченка (м. Богодухів, акти від 25.02.2015 р. (Додаток Д.3), 27.06.2017 р. (Додаток Д.4)).

Отримано 3 акти впровадження у навчальний процес НН ІХТБ ХДУХТ (акти від 06.04.2012 р., 25.05.2015 р., 17.05.2017 р.) у дисципліну «Технологія сушіння плодів та овочів» в формі доповнення змісту лекцій дисципліни новими науковими даними (Додатки Е.1, Е.2, Е.3).

## Висновки до розділу 6

1. Проведено дослідження окремих функціонально-технологічних властивостей та показників якості продукції, отриманої після таких технологічних операцій, як сушіння, гідротермічна обробка та випарювання.

2. Доведено, швидковідновлювані каші, отримані гідротермічною обробкою круп з ІнтМО, після відновлення представляють собою густу однорідну кашу, яка може використовуватися як гарнір для других страв. Установлено, що органолептичні показники розробленої продукції, а саме: зовнішній вигляд, колір, смак, запах, задовольняють норми. Тензометричними та мікробіологічними дослідженнями встановлено: ці напівфабрикати мають тривалі терміни зберігання, які становлять не менше ніж 12 міс. від дати виробництва за температури не більше ніж 25 °С та відносної вологості повітря не більше ніж 75%. Дослідженнями пористості та відновлюваності сировини та швидковідновлюваних каш установлено: під час гідротермічної обробки з ІнтМО відбувається розвиток пористої структури сировини. Дослідження відновлюваності каш підтвердили, що розроблені каші поглинають воду під час приготування в 2...2,5 разу швидше, ніж швидковідновлювані каші, отримані традиційними способами, що підвищує їх функціонально-технологічні властивості.

3. Визначено з використанням методики оцінки кольору продукції, що базується на використанні адитивної колориметричної системи XYZ, діапазон температур термостата, які є раціональними з точки зору збереження кольору продукції під час сушіння в термостаті нової конструкції зі штучно створеним обтюратором. Визначено, що втрати вітаміну С відносно вихідної сировини для чорниці, отриманої сушінням в термостаті з ІнтМО за температури 70 °С, становлять 15%, що майже в 2,3 разу менше порівняно зі зразком отриманим конвективним сушінням за тієї ж температури. Відзначено, що перевагами отриманої продукції над

продукцією, одержаною ЗТП-сушінням, є відсутність спеціальної попередньої підготовки з внесенням добавок (крохмаль, метилцелюлоза).

Мікробіологічними дослідженнями до та після зберігання впродовж 12 міс. сушеної чорниці та сушеної чорної смородини, отриманих сушінням в термостаті з використанням ІнТМО, доведено, що вони не перевищують встановлені для даної групи товарів нормативи.

4. Спектрофотометричними дослідження концентрату соку чорниці, отриманого випарюванням в термостаті з використанням ІнТМО, та концентрату отриманого у випарному апараті, доведено, що більш прийнятним, з точки зору збереження вихідних колірних властивостей сировини, є зразок, отриманий випарюванням у термостаті з ІнТМО. Відмічено, що очевидною перевагою випарювання у термостаті з використанням ІнТМО з точки зору енерговитрат та складності використовуваного обладнання є те, що випарювання відбувається за атмосферного тиску та за низького температурного впливу (83...85 °С).

5. Результати, отримані в роботі, пройшли апробацію на ТОВ «Терра», ТОВ «Спільне україно-німецьке підприємство «Злаки», ПСП ім. Т.Г. Шевченка. Результати досліджень впроваджені в навчальний процес ХДУХТ.

## ВИСНОВКИ

1. Сформульовано гіпотезу ефекту ІнТМО, яка полягає в індукуванні за рахунок флуктуацій переходу системи «рідина – пара» від нестійкої рівноваги до стійкої за умови термостатування. Ефект супроводжується розсіюванням теплоти термостата за рахунок видалення з нього рідини через фазовий перехід. Установлено, що потік маси рідини, яка виноситься із термостата в газовому стані, індукує тепловий потік, який розсіюється всередині термостата. Виявлено необхідні та достатні умови організації та керування ефектом ІнТМО, за якими сформульовано наукову концепцію роботи.

2. Доведено, що за ефекту ІнТМО система «оточуюче середовище – внутрішнє середовище термостата» є проточною та динамічною по відношенню до теплової енергії та маси, де спостерігаються процеси самоорганізації, які й зумовлюють ефективне розсіювання теплової енергії. Відзначено, що площа під негативною ділянкою фазової траєкторії на фазовій площині, яка становить від 10 до 30% загальної площі та яка пропорційна частині тепловмісту внутрішнього середовища термостата, витраченому на фазовий перехід рідини цього середовища в газовий стан, є критерієм енергоефективності ІнТМО.

3. Обґрунтовано введення поняття «системна вода» як одного із параметрів порядку ІнТМО та доцільність розрахунку мольних концентрацій для систем «системна вода – складові харчової системи». Доведено, що внесення пектину, цукру, еламіну, крохмалю, концентратів тваринних білків (Сканпро 91, 95), напівфабрикату кісткового харчового в плодово-ягідну сировину та сировину тваринного походження приводить до зменшення на 10...20% кількості системної води, яка бере участь у ІнТМО. Дослідженнями динамічної поведінки модельних тіл із крохмалю та з клейковини ЕПР-методом встановлено, що системна вода досліджуваних тіл має дві форми зв'язку з сухими речовинами. Установлено, що для тіл із крохмалю наявні три структури, які визначаються молярною масою високомолекулярного

сполучення, яким є крохмаль. Відзначено, що частина системної води, яка не бере участі в ІнТМО, визначає вимоги до умов зберігання харчової сировини та продуктів.

4. Дослідженнями тепломасообміну в прототипі апарата для випарювання, концентрування та згущення з ІнТМО, який являє термостат з обтюратором, що утримує рідину та газ, встановлено, що кипіння за температури термостата від 100 до 140 °С ні для спирту, ні для води, ні для їх суміші не відбувалося за атмосферного тиску. Встановлено, що етиловий спирт та вода переходять до газового стану під час ІнТМО окремо. Закінчення видалення рідкої фази компонентів суміші фіксується за особливостями кінетики температури, що рекомендовано використовувати для процесів ректифікації, перегонки або дистиляція без фази кипіння в термостаті з ІнТМО.

5. Дослідженнями ІнТМО за наявності в термостаті твердої, рідкої та газової фаз із розривами між фазами встановлений основний параметр порядку ефекта ІнТМО – наявність суцільності газового середовища всередині термостата. Доведено, що у разі забезпечення цього параметра порядку ефект ІнТМО спостерігається навіть за умови просторового відділення сухих речовин і рідини, що має практичну цінність для виконання операцій ароматизації або одночасної гідротермічної обробки з сушінням з просторовим відділенням компонент оброблюваної сировини в одному універсальному апараті. Моделюванням обробки з ІнТМО сировини з високою поруватістю або високим ступенем усадки (об'єми пустот до 30...50% внутрішнього об'єму термостата) та сировини з частинками, що мають газонепроникні включення, встановлено, що тривалість ІнТМО для окремих об'ємів ККПТ по всьому внутрішньому об'єму термостата відрізняється не більше ніж на 10%. Доведено, що особливості перетікання ІнТМО в будь-якому виділеному об'ємі внутрішнього середовища термостата відбивається на характері його перетікання для інших виділених об'ємів. Встановлено умови здійснення обробки сировини різної природи в

одному апараті без її змішування. Розрахунками встановлено: питома продуктивність робочої поверхні термостата в 1,7 разу більша порівняно з продуктивністю випаровування з відкритої поверхні води за тих же температури (75 °С) та швидкості руху повітря (10 м/с).

6. Установлено, що дефіцит теплоти, що надходить від стінок термостата до його внутрішнього середовища і становить 25...30% від теплоти, що витрачається на нагрівання внутрішнього середовища та фазовий перехід рідини, компенсується зовнішньою роботою потоку повітря, який рухається відносно обтюратора. Експериментальними дослідженнями доведено: температура і витрати повітря, що рухається відносно обтюратора, не чинять істотного впливу на тривалість ІнтМО і не є баластом енергії. Дослідженнями кінетики потоку теплоти, що витрачається всередині термостата, за швидкості потоку повітря від 4 до 13 м/с, який рухається відносно обтюраторів, установлено, що інтенсивність ІнтМО може регулюватися даним керуючим параметром у межах 15...20%. Визначений діапазон кутів обдування (від 35° до 55°), за яких енергоефективність ІнтМО менша вдвічі порівняно з кутами, за яких досягається найбільша енергоефективність (0° та 90°).

Експериментальні дослідження довели феноменологічну гіпотезу ефекту ІнтМО.

7. Розв'язано класичну задачу про розподіл температури і вологовмісту в термостатах циліндричної та паралелепіпедної форм методом R-функцій сумісно з методом малого параметра та проєкційним методом Бубнова–Гальоркіна. Обґрунтовано проведення фізико-математичного моделювання ефекту ІнтМО постановкою та вирішенням теплової задачі, де масообмін ураховано через функцію розвитку потужності дисипативних структур. Доведено, що ця модель є коректною для описання ІнтМО та застосування для інженерних розрахунків апаратів з ІнтМО.

8. Розроблено концептуальні рішення конструкцій нових апаратів з ІнтМО для виконання таких технологічних операцій харчової



промисловості: сушіння; гідротермічної обробки; випарювання, згущення сировини; ректифікації, перегонки, дистиляції розчинів, суспензій; охолодження, термостатування. На основі концептуальних рішень за запропонованими і стандартними рівняннями теплового й масового балансів розраховано апарат для гідротермічної обробки круп з використанням ІнтМО, де кінцевою продукцією є швидковідновлювані каші. Доведено, що економічний ефект розробки досягається за рахунок скорочення кількості технологічних операцій, що використовуються, виконання основних операцій в одному універсальному апараті та за рахунок скорочення енерговитрат на одиницю продукції більш ніж у 1,3 разу порівняно з існуючими способами. Результати, отримані в роботі, пройшли апробацію на ТОВ «Терра», ТОВ «Спільне україно-німецьке підприємство «Злаки», ПСП ім. Т.Г. Шевченка. Результати досліджень упроваджені в навчальний процес ХДУХТ.

9. Установлено, що зміна кольорового тону та чистоти кольору сушеної чорниці, отриманої в термостаті з ІнтМО нової конструкції зі штучно створеним обтюратором, відрізняється від вихідної сировини не більше ніж на 5...7%, втрати вітаміну С становлять 15%, що в 2,3 разу менше порівняно зі зразком, отриманим конвективним сушінням. Спектрофотометричними дослідженнями концентрату соку чорниці, отриманого випарюванням з ІнтМО (відмінність від вихідної сировини на 6,5%), доведено його вищу якість порівняно з концентратом, отриманим у вакуум-випарному апараті (відмінність від вихідної сировини на 18%). Дослідженнями показників якості швидковідновлюваних каш, отриманих гідротермічною обробкою з ІнтМО, установлено, що розроблена продукція поглинає воду під час приготування в 2...2,5 разу швидше, ніж каші, отримані традиційними способами, що підвищує їх функціонально-технологічні властивості; при цьому мікробіологічні та органолептичні (зовнішній вигляд, колір, смак, запах) показники розробленої продукції задовольняють норми.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Энерготехнологические процессы. Проблемы и перспективы / под редакцией д-ра техн. наук Л.В. Лысенко. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 190 с.
2. Рудобашта С. П. Теплоэнергетические установки и системы сельского хозяйства / Р. А. Амерханов, А. С. Бессараб, Б. Х. Драганов, С. П. Рудобашта, Г. Г. Шишко – М. : Колос-Пресс.2002. – 423 с.
3. Быков Г. А. Системный анализ термодинамики энерготехнологических процессов тепловых машин / Г. А. Быков, О. Г. Быкова, В. Ю. Лупашевская // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2010. – №12 (82). – С. 37–42.
4. Grandy W.T. Jr. Entropy and the Time Evolution of Macroscopic Systems [Текст] / W.T. Jr. Grandy. – Oxford University Press : Oxford, 2008. – P. 55–58.
5. Schmidt-Rohr K. Expansion Work without the External Pressure, and Thermodynamics in Terms of Quasistatic Irreversible Processes / K. Schmidt-Rohr // J. Chem. Educ. – 2014. – P. 402–409. (doi:10.1021/ed3008704)
6. Arnab S. Entropy production theorems and some consequences / Saha Arnab, Sourabh Lahiri, A. M. Jayannavar // Physical Review: The American Physical Society. – 2009. – P. 1–10.
7. Квасников И. А. Термодинамика и статистическая физика. Т. 1. Теория равновесных систем: Термодинамика. / И. А. Квасников – 2-е изд., суц. перераб. и доп. – М. : Едиториал УРСС, 2002. – 240 с.
8. Steurer W. Twenty years of structure research on quasicrystals. Part I. Pentagonal, octagonal, decagonal and dodecagonal quasicrystals / W. Steurer // Z. Kristallogr. – 2004. – P. 391–446.
9. Yacobi B.G. Semiconductor Materials: An Introduction to Basic Principles / B. G. Yacobi // Springer. – 2003. – P. 1–3.

10. Matthiesen J. Observation of All the Intermediate Steps of a Chemical Reaction on an Oxide Surface by Scanning Tunneling Microscopy / J. Matthiesen, S. Wendt, J. Hansen, G. K. Madsen, E. Lira, P. Galliker, E. K. Vestergaard, R. Schaub, E. Laegsgaard, B. Hammer, F. Besenbacher // ACS Nano. – 2009. – №3 (3). – P. 517–526. (doi:10.1021/nn8008245)

11. Карпов М. О. Связь ресурсосбережения с экологичностью пищевых производств / М. О. Карпов, А. Г. Леу // В сборнике: Научная мысль XXI века: конвергенция знаний Материалы Международной научно-практической конференции НИЦ" Поволжская научная корпорация. – 2016. – С. 157-159.

12. Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року [Электронный ресурс] / Державне агентство з енергозбереження та енергоефективності України. – Режим доступа : [http://saee.gov.ua/sites/default/files/documents/Presentation\\_NAPRES\\_Norw\\_OCT\\_3\\_ukr.pdf](http://saee.gov.ua/sites/default/files/documents/Presentation_NAPRES_Norw_OCT_3_ukr.pdf) – 10.01.2017 г. – Загл. с экрана.

13. Погожих М. І. Потенційні можливості штучного керування процесом сушіння вологої сировини / М. І. Погожих, А. В. Пак, А. О. Пак // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність : Міжнародна науково-практична конференція, 14 травня 2015 р. : [тези у 2-х ч.] / редкол. : О. І. Черевко [та ін.]. – Харків : ХДУХТ, 2015. – Ч. 1. – С. 300-301.

14. Погожих М. І. Розвиток наукових основ ефективного керування технікою та технологією ЗТП-сушіння харчової сировини / М. І. Погожих, А. О. Пак // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність : Міжнародна науково-практична конференція, 22 травня 2014 р. : [тези у 2-х ч.] / редкол. : О. І. Черевко [та ін.]. – Харків : ХДУХТ, 2014. – Ч. 1. – С.3-4

15. Артиков А. А. Концентрирование соков в системе центрифугирование-выпаривание / А. А. Артиков, О. Р. Абдурахмонов // Пиво и напитки. – 2005. – №. 3. – С. 24-24.

16. Armerding G. D. Evaporation methods as applied to the food industry // *Advances in food research*. – 1966. – Т. 15. – Р. 303-358.
17. Brennan J. G. Evaporation and dehydration // *Food Processing Handbook*. – 2006. – Р. 71-124.
18. Короткий И. А. Технологии криоконцентрирования в пищевой промышленности / И. А. Короткий, Д. Е. Федоров, О. М. Мальцева // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте». – 2012. – С. 13.
19. Процессы и аппараты пищевых производств : учеб. для вузов / А. Н. Остриков, О. В. Абрамов, А. В. Логинов [и др.] ; под ред. А. Н. Острикова. – СПб. : ГИОРД, 2012. – 616 с.
20. Хоконова М. Б. Совершенствование технологии производства плодово-ягодных экстрактов/ М. Б. Хоконова // Проблемы и перспективы технических наук: сборник статей международной научно-практической конференции (8 мая 2015 г., г. Уфа). – Уфа : АЭТЕРНА, 2015. – С. 206.
21. Голыбин В. А. Пути повышения энергоэффективности сахарного производства / Голыбин В. А. и др. // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2014. – №. 1 (59). – С. 185-188.
22. Бурдо О. Г. Повышение энергетической эффективности процессов обезвоживания пищевого сырья / О. Г. Бурдо, И. В. Безбах, А. В. Зыков и др. // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2008. – № 2. – С. 23-28.
23. Шерemet А. В. Использование баромембранного оборудования на молочных предприятиях / А. В. Шерemet // Молочная промышленность. – 2012. – №. 11. – С. 45-45.
24. Емельянов А. А. Подавление пены при выпаривании жидкого сельскохозяйственного сырья в вакууме / А. А. Емельянов, К. А. Емельянов // Пиво и напитки. – 2009. – №. 1. – С. 38-39.

25. Савостин А. В. Эффективность антинакипинов при выпаривании соков свеклосахарного производства / А. В. Савостин, В. О. Городецкий // Сахар. – 2014. – №. 10. – С. 47-50.
26. Остриков А. Н. Исследование кинетики процесса концентрирования плодовоовощного сырья методом двухстадийного выпаривания / А. Н. Остриков, Ф. Н. Вертяков // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2008. – №. 9. – С. 28-29.
27. Shaw P. E. Evaluation of concentrated orange and passionfruit juices prepared by osmotic evaporation / P. E. Shaw et al. // LWT-Food Science and Technology. – 2001. – Т. 34. – №. 2. – P. 60-65.
28. Девярых Г. Г. Глубокая очистка веществ / Г. Г. Девярых, Ю. Е. Еллиев – М. : Высшая школа, 1990. – 192 с.
29. Kravchenko A. I. Simple substances refining: efficiency of distillation methods / Kravchenko A. I. // Functional Materials. – 2000 – V.7.– N.2. – P. 315-318.
30. Лежнева Н. В. Моделирование и диагностика процесса дистилляции в роторно-пленочном испарителе с шарнирно закрепленными лопастями с целью повышения его эффективности / Н. В. Лежнева, В. И. Елизаров, В. В. Гетман // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – №. 18. – С. 185-192
31. Калимуллин И. Р. Совершенствование системы водоподготовки предприятий химической и пищевой промышленности / И. Р. Калимуллин, Г. Х. Гумерова, А. Н. Николаев // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16. – №. 2. С. 142-144
32. Wang L. Recent developments in numerical modelling of heating and cooling processes in the food industry – a review / L. Wang, D. W. Sun // Trends in Food Science & Technology. – 2003. – Т. 14. – №. 10. – P. 408-423.
33. Фролова Н. Е. New possibilities of processing of essential oils for food aromatisation / Н. Е. Фролова, О. М. Усатюк // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2014. – Т. 2. – №. 12 (68). – С. 24-29.

34. Силка І. М. Нові підходи до ароматизації спре дів / І. М. Силка // Таврійський науковий вісник. – 2010. – №. 72. – С. 104-110.
35. Дадашев М. Н. Исследование процесса экстрагирования ароматических веществ из возобновляемого растительного сырья / М. Н. Дадашев, Д. В. Новосельцев, В. Т. Новосельцев // Оборонный комплекс-научно-техническому прогрессу России. – 2005. – №. 3. – С. 56-59.
36. Умрихин Е. Д. Исследование сопряженного тепломассообмена при ректификации многокомпонентных спиртовых смесей с учетом термических эффектов / Е. Д. Умрихин, Е. Н. Константинов // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 1999. – №. 4.– С. 57-61
37. Короткова Т. Г. Разработка математической модели периодической ректификации насадочной колонны / Т. Г. Короткова, Е. Н. Константинов // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2012. – Т. 326. – №. 2-3. – С. 108-112
38. Войнов А. Н. Ректификация этилового спирта в колоннах со спирально-призматической насадкой / А. Н. Войнов и др. // Техника и технология пищевых производств. – 2012. – №. 4 (27). – С. 1-5
39. Лихтенберг Л. А. Производство спирта из зерна: перегонка и ректификация спирта / Л. А. Лихтенберг // Пищевая промышленность. – 1997. – №. 7. – С. 68-69.
40. De Moura L. F. Effect of thermal rectification on colorimetric properties of *Eucalyptus grandis* and *Pinus caribaea* var. *hondurensis* woods / L. F. De Moura et al. // *Scientia Forestalis*. – 2011. – Т. 39. – №. 89. – P. 69-76.
41. Дмитриев А. В. Снижение энергетических затрат при ректификации смеси этиловый спирт-вода / А. В. Дмитриев, О. С. Дмитриева, И. Н. Мадышев // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т. 18. – №. 11. – С. 89-91.
42. Войнов Н. А. Получение безводного этанола при ректификации под вакуумом / Н. А. Войнов, А. В. Кустов, А. Н. Николаев // Хвойные бореальной зоны. – 2012. – Т. 30. – №. 3-4. – С. 373-378.

43. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л. Л. Энергосберегающая модернизация ректификационных установок с использованием пластинчатого теплообменного оборудования / ТОВАЖНЯНСКИЙ Л. Л. и др. // Интегрированные технологии и энергосбережение: Энергетика теплотехнологии и энергосбережение №2 – 2006. – С. 2006. – С.3-6

44. Dooge James C.I. Concepts of the hydrological Cycle. Ancient and modern / James C.I. Dooge // International Symposium OH<sub>2</sub> «Origins and History of Hydrology» (9-11 May 2001, Dijon). – Dijon, 2001. – P. 1–10.

45. Гинзбург А. С. Сушка пищевых продуктов / А. С. Гинзбург. – М. : Пищепромиздат, 1960. – 684с.

46. Лыков А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1968. – 470с.

47. Лыков А. В. Тепломассобмен : [Справочник] / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1971. – 476с.

48. Филоненко Г. К. Сушка пищевых растительных материалов/ Г. К. Филоненко, М. А. Гришин, Я. М. Гольденберг, В. К. Коссек. – М.: Пищевая промышленность, 1971. – 438 с.

49. Долинский А.А. Теплофизические процессы в эмульсиях / А. А. Долинский, А. М. Павленко, Б. И. Басок. – К. : Наукова думка, 2005. – 265 с.

50. Халатов А. А. Нанотехнологии в энергетике и проблемы теплофизики / А. А. Халатов, А. А. Долинский // Промышленная теплотехника. – 2010. – Т.32. – №4. – С. 5-14.

51. Павленко А. М. Кинетика испарения в процессах гомогенизации / А. М. Павленко, Р. А. Климов, Б. И. Басок // Промышленная теплотехника. – 2006. – т.28 – № 6. – С. 14-20.

52. Петрова Ж. А. Особенности сушки антиоксидантных продуктов / Ж. А. Петрова // Промышленная теплотехника. – 2011. – №7. – С. 162-163.

53. Снежкін Ю. Ф., Петрова Ж. О. Харчові порошки з рослинної сировини. Класифікація, методи отримання, аналіз ринку / Ю. Ф. Снежкін, Ж. О. Петрова // Біотехнологія. – Т. 3. – № 5 – 2010. – С. 43-49.

54. Снежкін Ю. Ф. Теплообмінні процеси під час одержання каротиновмісних порошків // Ю. Ф. Снежкін, Ж. О. Петрова / Академперіодика. Київ. – 2007. – 162 с.

55. Снежкін Ю. Ф. Теплонасосна зерносушарка для насінневого зерна // Ю. Ф. Снежкін, В. М. Пазюк, Ж. О. Петрова, Д. М. Чапаєв // Поліграф-Сервіс. Київ. – 2012. – 154 с.

56. Створення енергоефективних теплотехнологій виробництва функціональних харчових порошків : автореф. дис ... д-ра техн. наук: 05.14.06 / Жанна Олександрівна Петрова . – Київ, 2013 . – 41 с.

57. Пат. 46595 Україна МКИ С09 В 61/00. Спосіб одержання харчового барвника з столового буряку / Снежкін Ю. Ф., Харін О. О., Михайлик Т. О., Петрова Ж. О.; заявник і патентовласник Інститут технічної теплофізики. – № 2001096136; заявл. 05.09.01; опубл. 15.11.04; Бюл. №11. – 6 с.

58. Пат. 109360 Україна МПК А32L 1/20 (2006.01), А32В 7/02 (2006.01), А32L 1/212 (2006.01), А32L 1/2165 (2006.01), А32L 1/308 (2006.01). Спосіб одержання пребіотичного порошку з яблук та кабачків / Петрова Ж. О., Снежкін Ю. Ф., Пазюк В.М., Гетманюк К.М.; заявник і патентовласник Інститут технічної теплофізики. – № 201406139; заявл. 04.06.14; опубл. 10.08.15; Бюл. №15. – 4 с.

59. Пат. 42357 Україна МПК А32L 1/212, А32L 1/00. Спосіб одержання вівсяно-моркв'яного порошку / Снежкін Ю. Ф., Петрова Ж. О., Назаренко К. М.; заявник і патентовласник Інститут технічної теплофізики. – №200903094; заявл. 02.04.09; опубл. 25.06.09; Бюл. №12. – 4 с.

60. Снежкин Ю. Ф. Определение энергетических затрат при сушке коллоидных капиллярно-пористых материалов / Ю. Ф. Снежкин, Н. А. Дабижа, Р. А. Шапарь // Промышленная теплотехника. – 2003. – Т.25, приложение к №4. – С. 198-200.



61. Долинский А. А. Кинетика и технология сушки распылением / А. А. Долинский, К. Д. Малецкая, В. В. Шморгун. – К. : Наук. Думка, 1987. – 224 с.
62. Малецкая К. Д. Теплофизические основы тепловлагодпереноса в системе «капля – парогазовая среда» и методы оптимизации процессов сушки распылением / К. Д. Малецкая // Промышленная теплотехника. – 1998. – Т. 20. – С. 35-39.
63. Переяславцева Е. А. Особенности процесса распылительной сушки высоковлажной биомассы *Spirulina platensis* / Е. А. Переяславцева, К. Д. Малецкая // Промышленная теплотехника. – 2008. – Т.30. – № 3. – С. 16-20.
64. Долинский А. А. Распылительная сушка Т. 1 : Теплофизические основы. Методы интенсификации и энергосбережения : в 2 т. / А. А. Долинский, К. Д. Малецкая ; НАН Украины, Ин-т техн. теплофизики. – К. : Академперіодика, 2011. – 375 с. ISBN 978-966-360-175-5
65. Станкевич Г. М. Современная сушка семян подсолнечника – залог их качества и сохранности / Г. М. Станкевич // Олійно-жировий комплекс. – 2003. – №. 2. – С. 25-28.
66. Станкевич Г. Н. Анализ эффективности комбинированных способов сушки зерна / Г. Н. Станкевич // Материалы Междунар. научно-технич. конф. «Повышение эффективности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности», посвящ. 105-летию со дня рождения А.Н. Плановского. – Т.2. – 2016. – С. 31-35
67. Станкевич Г. М. Основні напрями вдосконалення технології та техніки сушіння зерна / Г. М. Станкевич // Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини : Всеукр. наук.-практ. конф. до 25-річчя факультету обладнання та технічного сервісу ХДУХТ, 29 жовтня 2015 р. : [тези] / редкол. : О. І. Черевко [та ін.] ; Харк. держ. ун-т харч. та торгівлі. – Х. : ХДУХТ, 2015. – С. 3-4

68. Станкевич Г. Н. Научные основы совершенствования сушки зерна и кормовых средств : Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.03 / Г. Н. Станкевич ; [Одесская гос. академия пищевых технологий]. – О., 1997. – 35 с.

69. Погожих Н. И. Научные основы теории и техники сушки пищевого сырья в массообменных модулях : дис. ... д-ра техн. наук / Н. И. Погожих. – Харьков : ХДАТОХ, 2002. – 331 с.

70. Потапов В. А. Научные основы анализа и управления кинетикой сушки пищевого сырья : дис. ... д-ра. техн. наук / Потапов В. А. – Харьков, 2007. – 348с.

71. Бурдо О.Г. Кінетика сушіння пшениці в апаратах на базі термосифонів. [Текст] : наук. пр. ОНАХТ / О.Г. Бурдо, И.В. Безбах, В.И. Донкоглов. – Вип. №36. – Т. 1. – Одеса, 2009. – с.297-302.

72. Бурдо, О.Г. Енергоекономні схеми екологічно безпечних зерносушарок / О. Г. Бурдо, О. В. Зиков, О. В. Воскресенська // Зерно і хліб. – 2005. – №4 – С. 18-19.

73. Терзиев С. Г. Стратегія розвитку та перспективи впровадження високих енерготехнологій в АПК / О. Г. Бурдо, С. Г. Терзієв // Наукові праці ОДАХТ. – 1996. – Вип. 16. – С. 244-245.

74. Бурдо О. Г. Исследование модуля ленточной сушилки растительного сырья с комбинированным электромагнитным подводом энергии : материалы IV Международной научно-практической конференции / О. Г. Бурдо, С. Г. Терзиев, И. И. Яровой, Н. В. Ружицкая // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ-2011. – Т.1, Москва, 2011. – С. 422 – 426.

75. Бурдо О. Г. Эволюция сушильных установок [Текст] / О. Г. Бурдо. – Одесса: Полиграф, 2010 – 368 с.

76. Пат. 107735 Україна МПК F26B 17/00, F26B 3/00. Пристрій для сушіння харчових дисперсних продуктів / Безбах І. В., Зиков О. В., Бурдо О. Г.; заявник і патентовласник Одеська національна академія харчових

технологій. – № u201511448; заявл. 20.11.15; опубл. 24.06.2016; Бюл. № 12. – 4 с.

77. Пат. 88927 Україна МПК F26B 15/00. Сушарка для сипучих матеріалів / Светлічний П. І., Бурдо О. Г., Яровий І. І.; заявник і патентовласник Одеська національна академія харчових технологій. – № u201311015; заявл. 16.09.13; опубл. 10.04.2014; Бюл. № 12. – 4 с.

78. Поперечный А. Н. Экспериментальное исследование массопереноса при сушке овощей в центробежном псевдооживленном слое / А. Н. Поперечный // Наук. пр. ОНАХТ.–2008.–Вип. – 2008. – Т. 32. – №. 35. – С. 182-186.

79. Поперечный А. Н. Сушка пищевого растительного сырья в центробежном псевдооживленном слое / А. Н. Поперечный // Хранителна наука, техника и технологии: научни труд. – Пловдив: Университет по хранителни технологии. – 2007. – Т. 54. – С. 137-141.

80. Пат. 95859 Україна МПК A23L 3/005. Спосіб сушіння плодкових кісточок / Миронова Н. О., Жданов І. В., Поперечний А. М.; заявник і патентовласник Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського. – № u201407890; заявл. 14.07.14; опубл. 12.01.2015; Бюл. № 1. – 4 с.

81. Пат. 95857 Україна МПК A23L 3/005. Вібраційна радіаційна сушарка / Миронова Н. О., Жданов І. В., Поперечний А. М.; заявник і патентовласник Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського. – № u201407887; заявл. 14.07.14; опубл. 12.01.2015; Бюл. № 1. – 4 с.

82. Атаманюк В. М. Фільтраційне сушіння. Гідродинамічний опір полідисперсного шару зернистого матеріалу / В. М. Атаманюк // Хімічна промисловість України. – 2004. – № 6. – С. 47-51.

83. Атаманюк В. М. Гідродинаміка фільтраційного сушіння гранульованого поліакриламід / В. М. Атаманюк // Вісник НУ «Львівська

політехніка», Хімія, технологія речовин та їх застосування. – Львів, 2005. – № 536. – С. 139-146.

84. Атаманюк В. М. Розрахунок установки фільтраційного сушіння дрібнодисперсного вугілля після флотації / В. М. Атаманюк, Я. М. Ханик // Український міжвідомчий наук.-техн. збірник «Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні». – Львів, 2005. – № 39. – С. 5-11.

85. Атаманюк В. М. Гідродинаміка фільтраційного сушіння дисперсного матеріалу / В. М. Атаманюк // Всеукраїнський наук.-техн. журнал. Промислова гідравліка і пневматика. – Вінниця, 2006. – № 1 (11). – С. 12-17.

86. Завалий А. А. Влияние формы отражающих поверхностей на равномерность облучения продукта сушки в инфракрасной сушильной камере / А. А. Завалий, И. В. Янович // Пищевая наука и технология: сб. научн. тр. – Одесса: Одесская национальная академия пищевых технологий. – 2010. – №. 4. – С. 91-95.

87. Завалий А. А. Инфракрасная камера для сушки плодов и овощей / А. А. Завалий, И. В. Янович // Труды Таврического государственного агротехнологического университета. – 2010. – №. 10. – С. 103-110.

88. Завалий А. А. Сравнительная оценка энергетических затрат при сушке продуктов питания инфракрасным и конвективным способами в устройствах камерного типа / А. А. Завалий, И. В. Янович, Л. А. Лаго // Харчова наука і технологія. – 2010. – №. 3. – С. 128-132.

89. Пат № 92596 UA, МПК F26B 9/06. Сушильний пристрій / Снежкін Ю. Ф., Завалій О. О., Рутенко В. С.; заявник та патентовласник Національний університет біоресурсів і природокористування України. – № u201402833; заявл. 20.03.2014; опубл. 26.08.2014, Бюл. № 16. – 5 с.

90. Завалий А. А. Разработка и тепловое моделирование устройств инфракрасной сушки термолабильных материалов / А. А. Завалий, Ю. Ф. Снежкин – М-во образования и науки Рос. Федерации, Крым. федер. ун-т им.

В. И. Вернадского. – Симферополь : Ариал, 2016. – 263 с. ISBN 978-5-906813-99-2

91. Бессараб О. С. Методи визначення форми каналів розпилувальних пристроїв сушильних установок / О. С. Бессараб, В. В. Шутюк, В. І. Боднар, В. П. Василів // Науковий вісник НУБіП України. – К., 2013. – Вип. 185, Ч. 2. – С. 96-102.

92. Іващенко Н. В. Узагальнення кінетики сушіння зв'язнодисперсних структурованих харчових продуктів / Н. В. Іващенко, О. Ф. Буляндра, В. В. Шутюк // Цукор України. – 2012. – № 6-7. – С. 78-79.

93. Буляндра А. Ф., Бессараб А. С. Определяющие сушильные свойства пищевых продуктов и их классификация / А. Ф. Буляндра, А. С. Бессараб // Промышленная теплотехника. – 1990. – Т. 12. – №. 6. – С. 18-24.

94. Шутюк В. В. Сучасні тенденції розвитку наукових досліджень в сушильних технологіях / В. В. Шутюк, С. М. Василенко, О. С. Бессараб, В. П. Василів // Науковий вісник НУБіП України. – К., 2013. – Вип. 185, Ч.1. – С. 278–287. – (Серія: техніка та енергетика АПК).

95. Пат № 86027 UA, МПК F268 3/06 (2013). Конвеєрна стрічкова сушарка / Н.В. Іващенко, О.Ф. Буляндра, В.В. Шутюк, Б.І. Вербицький, О.С. Бессараб; заявник Національний університет харчових технологій. — № u201307343; заявл. 10.06.2013; опубл. 10.12.2013, Бюл. № 23, 2013 р. – 4 с.

96. Белінська К. О. Сучасний стан наукових досліджень у сушінні молока розпиллом і використання нетрадиційної сировини / К. О. Белінська, В. В. Шутюк, Н. О. Фалендиш // Наукові праці НУХТ.– К.: НУХТ, 2014. – Т.20, № 5. – С. 161-169.

97. Рудобашта С. П. Математическое моделирование процесса конвективной сушки дисперсных материалов / С. П. Рудобашта // Известия Академии наук. Энергетика. – 2000. – №. 4. – С. 98-109.

98. Рудобашта С. П. Зональный расчет кинетики сушки / С. П. Рудобашта, А. Н. Плановский, В. Н. Долгунин // Теоретические основы химической технологии. – 1978. – Т. 12. – №. 2. – С. 173-183.

99. Рудобашта С. П. Кинетика и аппаратурно-технологическое оформление конвективной сушки дисперсных материалов / С. П. Рудобашта В. М. Дмитриев / Современные энергозберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы): II Междунар. научно-практическая конференция. – М., 2005. – Т. 2. – С.17-27.

100. Сорочинский В. Ф. Снижение энергозатрат при конвективной сушке зерна / В. Ф. Сорочинский // Наукові праці [Одеської національної академії харчових технологій]. – 2010. – Вип. 38 (1). – С. 79-82. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Np\\_2010\\_38\(1\)\\_21](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Np_2010_38(1)_21).

101. Сорочинский В. Ф. Разработка технологии двухстадийной сушки зерна / В. Ф. Сорочинский. – М. : СЭТТ-2008. – Т.1. – С.345-352.

102. Сорочинский В. Ф. Эффективность сушки зерна на зерносушилках различных типов / В. Ф. Сорочинский // Хлебопродукты. – М. : 2009. – №3.– С.42-43.

103. Расев А. И. Тепловая обработка и сушка древесины. / Расев А.И. – М : ГОУ ВПО МГУЛ, 2009. – 360 с.

104. Barrett D. M. Dehydrated cherries / D. M. Barrett, L. P. Somogyi, H. S. Ramaswamy // Processing Fruits: Science and Technology, CRC Press. – 2004. – P. 506–507.

105. Yu L. Moisture sorption characteristics of freeze-dried, osmofreeze-dried, and osmo-air-dried cherries and blueberries / L. Yu, G. Mazza, D. S. Jayas // Transactions of the American Society of Agricultural Engineers. – 1999. – 42 (1). – P. 141–147

106. Costa S. S. Drying by spray drying in the food industry: Microencapsulation, process parameters and main carriers used / S. S. Costa et al. // African Journal of Food Science. – 2015. – Т. 9. – №. 9. – С. 462-470.

107. Ribeiro A. Spray-drying microencapsulation of synergistic antioxidant mushroom extracts and their use as functional food ingredients / A. Ribeiro et al. // Food chemistry. – 2015. – Т. 188. – P. 612-618.

108. Алексанян И. Ю. Высокоинтенсивная сушка пищевых продуктов. Пеносушка. Теория. Практика. Моделирование. / И. Ю. Алексанян, А. А. Буйнов ; Астраханск. гос. техн. ун-т. – Астрахань : Издательство Астраханского государственного технического университета, 2004. – 379 с. ISBN 5-89154-149-1

109. Потапов В. А. Фильтрационная сушка при повышенном давлении / В. А. Потапов, Е. Н. Якушенко, О. Ю. Гриценко // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – 2015. – Вип. 47(2). – С. 134-137. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Np\\_2015\\_47\(2\)\\_35](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Np_2015_47(2)_35).

110. Потапов В. О. Аналіз енергоефективності процесу сушіння в тепломасообмінному модулі за умови підвищеного тиску / В. О. Потапов, О. Ю. Гриценко // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. пр. / відпов. ред. О.І. Черевко. – 2014. – Вип. 1(19). – С.133–141.

111. Ruhanian S. Mathematical modeling and experimental analysis of potato thin-layer drying in an infrared-convective dryer / S. Ruhanian, K. Movagharnejad //Engineering in Agriculture, Environment and Food. – 2016. – Т. 9. – №. 1. – Р. 84-91.

112. Четвериков Е. А. Микроволновое и инфракрасное излучение в технологиях сушки продукции растительного происхождения / Е. А. Четвериков, Л. А. Лягина, А. П. Моисеев ; М-во сел. хоз-ва Рос. Федерации, Саратов. гос. аграр. ун-т им. Н. И. Вавилова. – Саратов : Саратовский ГАУ, 2016. – 185 с. ISBN 978-5-9908839-4-9

113. Riadh M. H. Infrared heating in food drying: An overview / M. H. Riadh et al. // Drying Technology. – 2015. – Т. 33. – №. 3. – Р. 322-335.

114. Giri S. K. Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms/ S. K. Giri, S. Prasad // Journal of food engineering. – 2007. – Т. 78. – №. 2. – Р. 512-521.

115. McMinn W. A. M. Thin-layer modelling of the convective, microwave, microwave-convective and microwave-vacuum drying of lactose

powder / W. A. M. McMinn // *Journal of Food Engineering*. – 2006. – Т. 72. – №.2. – P. 113-123.

116. Karaaslan S. N. Development of a drying model for combined microwave–fan-assisted convection drying of spinach / S. N. Karaaslan, I. K. Tuncer // *Biosystems Engineering*. – 2008. – Т. 100. – №. 1. – P. 44-52.

117. Vinson JA. Dried fruits: excellent in vivo and in vitro antioxidants / JA. Vinson, L. Zubic, P. Bose // *J Amer Coll Nutr*. – 2005. – № 24. – P. 44–50.

118. DeLong, D. Cherries: How to dry foods / DeLong, D. – HPBooks – 1992. – 29 p.

119. Павлюк Р. Ю. Новые технологии витаминных углеводсодержащих фитодобавок и их использование в продуктах профилактического действия / Р. Ю. Павлюк [и др.] ; Харьковская гос. академия технологии и организации питания, Украинский гос. ун-т пищевых технологий. – Х. : [б.в.] ; К. : [б.в.], 1997. – 290 с. – ISBN 5-7763-8314-5

120. Hui Yh. Handbook of fruits and fruit processing / Yh. Hui. – Blackwell Publishing, Oxford UK, 2006. – 81 p.

121. Hooshmand S. Viewpoint: Dried plum, an emerging functional food that may effectively improve bone health / S. Hooshmand, H. Arjmandi // *Ageing Res Reviews*. – 2009. – № 8. – P. 122–127.

122. Scanlin D. The Design, Construction and Use of an Indirect, Through-Pass, Solar Food Dryer / D. Scanlin // *Home Power magazine*. – 1997. – Issue No.57. – P. 62–72.

123. Ferreira A. G. Technical feasibility assessment of a solar chimney for food drying / A. G. Ferreira et al. // *Solar Energy*. – 2008. – Т. 82. – №. 3. – P. 198-205.

124. Leon M. A. A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers / M. A. Leon, S. Kumar, S. C. Bhattacharya // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2002. – Т. 6. – №. 4. – P. 367-393.



125. Sharma A. Solar-energy drying systems: A review / A. Sharma, C. R. Chen, N. V. Lan // *Renewable and sustainable energy reviews*. – 2009. – Т. 13. – №. 6. – P. 1185-1210.

126. Yaldýz O. Thin layer solar drying of some vegetables / O. Yaldýz, C. Ertekýn // *Drying Technology*. – 2001. – Т. 19. – №. 3-4. – P. 583-597.

127. Bal L. M. Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products: a review / L. M. Bal, S. Satya, S. N. Naik // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2010. – Т. 14. – №. 8. – P. 2298-2314.

128. Потапов В.А. Кинетика сушки: анализ и управление процессом : монография / В.А. Потапов – Харьков: ХГУПТ, 2009. – 250 с.

129. Safonov A. O. The new multicriterial energy-saving system of control in veneer sheet drying. / A.O. Safonov, S.V.Sergeev // VIth International Symposium, «Composite wood materials», Zvolen, June 21-23, 2006 – №6. – P. 82-87.

130. Патент на корисну модель №58885, МПК F 26 В 17/00, F 26 В 11/00 (2011.01). Установка для сушіння м'яса мідій / Г.В. Дейниченко, Ю.В. Карнаушенко, О.І. Звегенцев. – за заявкою № и 201012284 ; заявл. 18.10.2010 ; опубл. 26.04.2011, Бюл. № 8.

131. Сороковая Н. Н. Моделирование тепло- и массопереноса при обезвоживании пористых тел с целью оптимизации процесса сушки: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.06 – техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика / Сороковая Наталия Николаевна; Институт технической теплофизики НАН Украины. – К., 2003. – 170 с.

132. Esmaili M. Grape Drying: A Review / M. Esmaili, R. Sotudeh-Gharebagh, K. Cronin, M. A. E. Mousavi, G. Rezazadeh // *Food Reviews International*. – 2007. – 23 (3). – 257 p.

133. Wilson T. Glycemic Responses to Sweetened Dried and Raw Cranberries in Humans with Type 2 Diabetes / T. Wilson, E. F. Luebke, M. C. Carrell, L. K. Leveranz, T. P. Schmidt, P. J. Limburg, N. Vorsa, A. P. Singh // *Journal of Food Science*. – 2010. – Vol. 75 (8). – P. 218-223.

134. Perussello C. A. Heat and mass transfer modeling of the osmoconvective drying of yacon roots (*Smallanthus sonchifolius*) / C. A. Perussello et al. // *Applied Thermal Engineering*. – 2014. – Т. 63. – №. 1. – P. 23-32.

135. De la Fuente-Blanco S. Food drying process by power ultrasound / De la Fuente-Blanco S. et al. // *Ultrasonics*. – 2006. – Т. 44. – P. 523-527.

136. Kumar C. Intermittent drying of food products: A critical review / C. Kumar, M. A. Karim, M. U. H. Joardder // *Journal of Food Engineering*. – 2014. – Т. 121. – P. 48-57.

137. Пат. 2096962 Рос. Федерация: МКИ А23 В7/03. Способ сушки пищевых продуктов : / Погожих Н. И., В. А. Потапов, Н. М. Цуркан; заявитель и патентообладатель Харьковский государственная академия технологии и организации питания. – №94033280/13; заявл. 13.09.94; опубл. 22.06.89, Бюл. № 40. – 3 с.

138. Погожих Н. И. Разработка интенсивного способа сушки картофеля со смешанным теплоподводом и анализ процесса методом ЯМР : дис. ... канд. техн. наук / Н. И. Погожих. – Одесса, 1989. – 205 с.

139. Потапов В.А. Рациональные режимы сушки овощей смешанным теплоподводом : дис. ... канд. техн. наук / В. А. Потапов. – Одесса, 1994. – 190 с.

140. Цуркан Н. М. Разработка рациональных режимов производства сушеного быстровосстанавливаемого картофеля : дис. ...канд. техн. наук / Н. М. Цуркан. – Харьков : ХДАТОХ., 2000. – 156 с.

141. Сомов А. С. Разработка и исследование процесса СТП-сушки моркови : дис. ... канд. техн. наук / А. С. Сомов. – Харків: ХДУХТ, 2000. – 180 с.

142. Пак А. О. Розробка процесу сушіння плодово-ягідної сировини змішаним теплопідводом зі штучним пороутворенням : дис. ... канд. техн. наук / А. О. Пак. – Харків: ХДУХТ, 2008. – 153 с.

143. Жеребкін М. В. Розробка процесу гідротермічної обробки круп з використанням принципів сушіння змішаним теплопідводом : дис. ... канд. техн. наук / М. В. Жеребкін. – Харків: ХДУХТ, 2013. – 151 с.

144. Якушенко Є. М. Підвищення енергоефективності процесу сушіння виноградних вичавок у масообмінному модулі з кондуктивним підведенням теплоти : дис... канд.техн. наук: 05.18.12 / Є. М. Якушенко. – Харків: ХДУХТ, 2014. – 230 с.

145. Погожих М. І. Сушіння плодово-ягідної сировини способом змішаного теплопідводу зі штучним пороутворенням : Монографія / М. І. Погожих, А. О. Пак, М. М. Цуркан. – Харків : ХДУХТ, 2009. – 102с.

146. Пригожин И. Введение в термодинамику необратимых процессов / И. Пригожин : Пер. с англ. – М. : ИЛ, 1960. – 127с.

147. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с при-родой / И. Пригожин, И. Стенгерс : Пер. с англ./ Общ. ред. В. И. Аршинова, Ю. Л. Климонтовича и Ю. В. Сачкова. – М. : Прогресс, 1986. – 432 с.

148. Потапов В. А. Анализ способов сушки и оценка качества сушеной виноградной выжимки / В. А. Потапов, Е. Н. Якушенко, М. В. Жеребкин // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 6/11 (66). – С. 38–41.

149. Пат 68263 Україна МПК А23L 3/005. Спосіб сушіння харчових продуктів / Якушенко Є. М., Потапов В. О., Погожих М. І. ; заявник і патентовласник Харківський державний університет харчування та торгівлі. – № u2003119857; заявл. 04.11.03; опубл. 15.07.2004; Бюл. № 7. – 3 с.

150. Pogozhikh M. The development of an artificial energotechnological process with the induced heat and mass transfer / M. Pogozhikh, A. Pak // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – №.1/8 (85). – P. 50–58. (doi: 10.15587/1729-4061.2017.91748)

151. Анищенко В. С. Динамические системы / В. С. Анищенко // Соросовский образовательный журнал. – №11, 1997. – С.77-84.

152. Динамическая система. Математическая энциклопедия. – М. : Советская энциклопедия. И. М. Виноградов. 1977-1985. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc\\_mathematics/1493/Динамическая система](http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_mathematics/1493/Динамическая_система)

153. Динамическая система // Энциклопедия физики и техники [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://femto.com.ua/articles/part\\_1/1018.html](http://femto.com.ua/articles/part_1/1018.html)

154. Динамическая система // Новая философская энциклопедия: В 4 тт. М.: Мысль. Под редакцией В. С. Стёпина. 2001. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc\\_philosophy/8265/Динамические системы](http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_philosophy/8265/Динамические_системы)

155. Анищенко В. С. Знакомство с нелинейной динамикой : Лекции соросовского профессора / В. С. Анищенко. – Институт компьютерных исследований, 2002. – 144 с.

156. Мала гірнича енциклопедія. т. III. (за редакцією В. С. Білецького). – Донецьк : Східний видавничий дім, 2013. – 644 с.

157. Суцільне середовище: Смыслов В.В. «Гидравлика и аэродинамика», Авиация: Энциклопедия. — М.: Большая Российская Энциклопедия. Главный редактор Г.П. Свищев. 1994.; О.В. Голубева Теоретическая механика. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.physic-explorer.ru/ponyatie\\_sploshnoy\\_sredi-427-1.html](http://www.physic-explorer.ru/ponyatie_sploshnoy_sredi-427-1.html)

158. Кошкин В. К. Нестационарный теплообмен / В. К. Кошкин, Э. К. Калинин, Г. А. Дрейцер, С. А. Ярхо. – М. : Машиностроение, 1973. – 328 с.

159. Белов В. В. Компьютерная реализация решения научно-технических и образовательных задач / В. В. Белов, И. В. Образцов, В. К. Иванов, Е. Н. Коноплев. – Тверь : ТвГТУ, 2015. – 108 с.

160. Погожих М. І. Штучний енерготехнологічний процес з індукованим тепломасообміном / М. І. Погожих, А. О. Пак // Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини : Всеукр. наук.-практ. конф. присв. 50-річчю Харківського державного

університету харчування та торгівлі, 1-2 червня 2017 р. : [тези] / редкол. : О. І. Черевко [та ін.] ; Харк. держ. ун-т харч. та торгівлі. – Х. : ХДУХТ, 2017. – С. 47-48.

161. Берлинер Л. Метод спиновых меток. Теория и применение / Л. Берлинер. – М. : Мир, 1979. – 400с.

162. Вертц Дж. Теория и практические приложения метода ЭПР / Дж. Вертц, Дж. Болтон. – М.: Мир, 1975. – 552 с.

163. Очков В. Ф. MathCAD 14 для студентов, инженеров и конструкторов / В. Ф.Очков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 368 с.

164. Дьяконов В. П. Система MathCAD: Справ очник / В. П. Дьяконов. – М.: Радио и связь, 1993. – 127 с.

165. MathCad 2000: учебный курс / В. Дьяконов. – СПб : Питер, 2000. – 592с.

166. Погожих М. І. Дослідження стану води в області гігроскопічного вологовмісту харчової сировини методом ЕПР-спінових міток / М. І. Погожих, І. С. Ромоданов, А. О. Пак // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: Зб. наук. праць / Редкол.: Черевко О.І. та ін.; Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. – Харків, 2007. – Вип. 1 (5). – С. 480-486.

167. Пат. 87562 UA : МПК G 01 N 24/10 Спосіб дослідження динамічної поведінки вологи в капілярно-пористих колоїдних матеріалах методом ЕПР-спінових міток під час сушіння [Текст] / Погожих М. І., Ромоданов І. С., Пак А. В., Пак А. О. – заявник та патентовласник ХДУХТ. – № u201310871; заявл. 10.09.2013; опубл. 10.02.2014, Бюл.№ 3 – 4 с.

168. Погожих Н. И. Исследование гигроскопических свойств среды для культивирования бактерий методом Фурье-анализа ЭПР-спектров / Н. И. Погожих, А. О. Пак, Я.В. Толстова // Тезисы докладов VII-й международной научно-технической конференции, 21-22 мая 2009 г., – Могилев: УО МГУП, 2009. – С.113

169. Погожих М. І. Аналіз стану вологи в полідисперсних системах методом ЕПР-спінових міток / М. І. Погожих, А. О. Пак // Тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції присвяченої 20-річчю з дня заснування факультету обладнання та технічного сервісу, 18 листопада 2010 р.: Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. –Харків, ХДУХТ: 2010. – С.278-279

170. Погожих М. І. Використання методу ЕПР-спінових міток під час дослідження стану вологи в харчовій сировині / М. І. Погожих, А. О. Пак // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі. Економічна стратегія і перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг [Текст] : Міжнародна науково-практична конференція, 19 травня 2011р. : [тези : у 4 ч.]. – Харків : ХДУХТ, 2011. – Ч.2. – С.83-84.

171. Погожих М. І. Методика дослідження стану вологи в капілярно-пористих колоїдних тілах методом ЕПР-спінових міток / М. І. Погожих, І. С. Ромоданов, А. О. Пак // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 2/6 (50). – С. 22–24.

172. Jordan D. W. Non-Linear Ordinary Differential Equations: Introduction for Scientists and Engineers (4th ed.) / D.W. Jordan; P. Smith // Oxford University Press. – 2007. – 560 p. ISBN 978-0-19-920825-8.

173. Steven Strogatz. Non-linear Dynamics and Chaos: With applications to Physics, Biology / Steven Strogatz // Chemistry and Engineering. – 2001. – 515 p. ISBN 9780738204536.

174. Никитенков Н. Н. Синергетика для инженеров / Н. Н. Никитенков, Н. А. Никитенкова. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 168 с.

175. Анищенко В. С. Регулярные и хаотические автоколебания. Синхронизация и влияние флуктуаций : монография / В. С. Анищенко, В. В. Астахов, Т. Е. Вадивасова. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2009. – 312 с. — ISBN 978-5-91559-066-2

176. Погожих М. І. Аналіз процесу індукованого тепломасообміну методом фазового простору / М. І. Погожих, А. О. Пак, А. В. Пак, М. В. Жеребкін // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. пр. / [редкол. : О. І. Черевко (відпов. ред.) та ін.]. – Харків : ХДУХТ, 2017. – Вип. 2(25) – С. 284-293

177. Погожих М.І., Пак А.О., Жеребкін М.В., Рурак Л.В. Фазовий портрет процесу індукованого тепломасообміну / М. І. Погожих, А. О. Пак, М. В. Жеребкін, Л. В. Рурак // Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини : Всеукр. наук.-практ. конф. присв. 50-річчю Харківського державного університету харчування та торгівлі, 1-2 червня 2017 р. : [тези] / редкол. : О. І. Черевко [та ін.] ; Харк. держ. ун-т харч. та торгівлі. – Х. : ХДУХТ, 2017. – С. 43-44.

178. Погожих М. І. Гідротермічна обробка круп із використанням принципів сушіння змішаним теплопідводом : Монографія / М. І. Погожих, А. О. Пак, А. В. Пак, М. В. Жеребкін. – Х. : ХДУХТ, 2014. – 170 с.

179. Dolinsek J. Novel NMR and EPR Techniques, in Lecture Notes in Physics / J. Dolinsek, M. Vilfan, S. Zumer // Springer Verlag. – 2006. – 441 p. DOI: 10.1007/b11540830

180. Декуша Л. В. Експериментальне визначення питомої теплоти випаровування / Л. В. Декуша, Ю. Ф. Снежкін, Л. І. Воробйов, Н. В. Дмитренко, В. А. Михайлик, Л. А. Боряк, Н. С. Дубовікова // Коммунальная и промышленная теплоэнергетика (Теплообеспечение – 2009): VII междунар. конф., 5-9 окт. 2009 г.: материалы конф. – Киев, 2009 / Опубликовано: Промышленная теплотехника. – 2009. – Т.31, №7. – С. 90-91.

181. Снежкин Ю. Ф. Измерение теплоты испарения воды в процессе сушки растительного сырья / Ю. Ф. Снежкин, В. А. Михайлик, Н. В. Дмитренко, Л. В. Декуша, Л. Й. Воробьев, Н. С. Дубовикова, Л. А. Боряк // Современные энергосберегающие тепловые технологии (СЭТТ-2011): IV междунар. науч.-практ. конф., 20-23 сент. 2011 г.: труды конф. – Москва, 2011. – Т.1. – С. 394-397.

182. Михайлик В. А. Связанная вода в древесине / В. А. Михайлик, Ю. Ф. Снежкин, Н. В. Дмитренко // IV Минский международный форум по тепло- и массообмену, 10-13 сентября 2012 года, г. Минск : Тезисы докладов и сообщений. – Минск: Институт тепло- и массообмена им. А.В.Лыкова, 2012. . – Том 1, часть 2. – С. 550–553.

183. Погожих М.І., Пак А.О. Метод исследования интенсивности испарения влаги с поверхности материала в процессе сушки / М. І. Погожих, А. О. Пак // Наукові праці ОНАХТ. – Серія: Технічні науки. – Одеса, 2008. – Вип. 32(35). – С. 97-100

184. Пак А. О. Установка для исследования испарения влаги из зерновых / А. О. Пак, І. М. Павлюк, О. С. Мольский // Тези доповідей міжн. наук. форуму «Харчові інновації та біотехнології». Збірка матеріалів конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. – Кемерово : КемТИПП, 2013. – С. 772-775.

185. Levy Y. Water and proteins : a love-hate relationship / Y. Levy, J. Onuchic // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 2004. – Vol. 101, Issue 10. – P. 3325–3326. DOI: 10.1073/pnas.0400157101

186. Bender C. J. Computational and Instrumental Methods in EPR, in Biological Magnetic Resonance / C. J. Bender, L. J. Berliner. – Springer Verlag, 2006 – 387 p. DOI: 10.1007/978-0-387-38880-9

187. Water Activity [Electronic resource] / Available at : [\http://www.wateractivity.org/free-vs-bound-water](http://www.wateractivity.org/free-vs-bound-water) – 04.06.2013. – Title from the screen

188. Is there “Bound Water” in Foods? [electronic resource] / Decagon Devices, Inc. – Available at : [\http://www.aqualab.com/education/is-there-bound-water-in-foods](http://www.aqualab.com/education/is-there-bound-water-in-foods) – 12.08.2013. – Title from the screen.

189. Погожих М. І. Дослідження системної води харчової сировини термодинамічними та молекулярно-кінетичними методами / М. І. Погожих, А. О. Пак, М. А. Чеканов, Є. О. Іштван, І. М. Павлюк // ЕЕJET, Східно-



европейський журнал передових технологій. – Харків, 2014. – № 5/11 (71). – С.42-46. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.27790

190. Погожих М. І. Дослідження системної вологи крохмалю зернових культур методом ЕПР / М. І. Погожих, А. О. Пак, А. В. Пак, М. В. Жеребкін // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 5/6 (59). – С. 62–66.

191. Вода в пищевых продуктах и для пищевых продуктов : Монография / гл. редактор Н.И. Погожих; Харьк. гос. ун-т пит. и торговли. – Х. : ХГУПТ, 2013. – 177 с.

192. Гришин М. А. Эффект динамического структурирования влаги в процессе сушки / М. А. Гришин, Н. И. Погожих, В. А. Потапов // Промышленная теплотехника. – 2001. – Т. 23, №. 4-5. – С. 100-105.

193. Перцевой Ф. В. Використання фізичних методів досліджень для вивчення вмісту вільної та зв'язаної вологи сирного продукту м'якого / Ф. В. Перцевой, О. Г. Дьяков, А. О. Пак, М. В. Обозна // Харчова наука і технологія. – 2011. – № 2. – С. 74-77. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Khnit\\_2011\\_2\\_27](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Khnit_2011_2_27)

194. Головка М. П. Вивчення гігроскопічних властивостей макаронних виробів, збагачених біоорганічними сполуками кальцію / М. П. Головка, А. О. Пак, М. М. Чуйко // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі. – 2011. – Вип. 2. – С. 245-250. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pt\\_2011\\_2\\_38](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pt_2011_2_38)

195. Перцевой Ф. В. Вивчення механізму дії добавок Сканпро на структурно-механічні властивості драглів / Ф. В. Перцевой, А. Т. Теймурова, М. І. Погожих, А. О. Пак // Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв: зб. наук. пр. / Харк. нац. техн. ун-т сільськ. госп-ва ім. П. Василенка. – Х., 2008. – Вип. 74. – С. 146–153.

196. Дюкарева Г. І. Дослідження впливу НКХ та еламіну форми зв'язку вологи в паштетах калориметричним методом / Г. І. Дюкарева, Т. М.

Головко, А. О. Пак, М. В. Серік // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, 2010. – №2/6(44). – С.67-69.

197. Пак А. О. Дослідження стану вологи пастоподібних напівфабрикатів у процесі заморожування, розморожування, зберігання / А. О. Пак, А. В. Євтушенко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2010. – № 3/10 (45). – С. 51–53.

198. Одарченко А. М. Дослідження змін вмісту каротиноїдів та вітаміну С фруктових начинок за різних температур зберігання / А. М. Одарченко, А. О. Пак, А. В. Євтушенко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2010. – № 1/6 (43). – С. 65–68.

199. Янчева М. О. Вплив композиції кріопротекторної дії на кількість вимороженої вологи в м'ясних січених напівфабрикатах / М. О. Янчева, А. О. Пак, Ю. В. Яковлева // Обладнання та технології харчових виробництв: Темат. зб. наук. пр. – Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського. – 2011. – Вип.27. – С. 281-285

200. Дюкарева Г. І. Влияние эламина и стевиозида на поверхностное натяжение яичной массы / Г. І. Дюкарева, А. О. Пак, Г. Є. Гасанова // Товари і ринки : наук журнал. – 2014. – № 1 (17). – С. 89-97.

201. Diukareva Galina. Determination of storage conditions for new biscuits using their sorption isotherms / Galina Diukareva, Andrii Pak, Anna Gasanova // Ukrainian Food Journal. – Kyiv, 2014. – Volume 3. Issue 2. – P. 249-256.

202. Перцевий Ф. В. Исследование количества вымороженной влаги в агаровых студнях с использованием пищевой белковой добавки / Ф. В. Перцевий, А. О. Пак, А. Т. Теймурова // Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої 70-річчю з дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ Беляєва М.І. «Стратегічні напрямки розвитку підприємств харчових виробництв, ресторанного господарства і торгівлі», 19 листопада 2008 р. – Харків : ХДУХТ. – С 147-148

203. Погожих М. І. Характеристики приладу для визначення вільної та зв'язаної вологи низькотемпературним калориметричним методом / М. І. Погожих, М. М. Цуркан, А. О. Пак // Обладнання та технології харчових виробництв: Темат. зб. наук. наук. пр. – Донецьк: ДонДУЕТ ім. М. Туган-Барановського, 2005. – Вип. 13. – С. 177-185.

204. Михайлик В. А. Исследование состояния воды в сахаросодержащем растительном сырье при его обезвоживании / В. А. Михайлик, Е. О. Давыдова // Промышленная теплотехника. – 2000. – Т. 22. – № 5-6. – С. 50-54.

205. Дакуорт Р. Б. Вода в пищевых продуктах / Р. Б. Дакуорт. – М. : Пищевая пром-сть, 1980. – 376 с.

206. Rockland L. B. Water Activity: Theory and Applications to Food / L. B. Rockland, L. R. Beuchat // Food Technol. – 1987. – P. 1241–1251

207. Fennema O. R. Food Chemistry (2nd ed.) / O. R. Fennema. – New York : Marcell Dekker Inc., 1985 – 465 p.

208. Буйлова Л. А. Динамика активности воды / Л. А. Буйлова, Е. А. Дубова // Переработка молока. – 2009. – № 7. – С. 29.

209. Рогов И. А. Значение показателя «активность воды» в оценке сельскохозяйственного сырья: обзорная информация / И. А. Рогов, У. Ч. Чоманов, А. М. Бражников и др. – М.: АгроНИИТЭИММП, 1987. – 44 с.

210. Михайлик В. А. Особенности поведения растворов сахаров при обезвоживании / В. А. Михайлик // Современные энергосберегающие тепловые технологии. СЭТТ–2008: труды III междунар. науч.-практ. конф., 16-20 сент. 2008 г.: в 2 т. – Москва–Тамбов, 2008. – Т. 1. – С.240-242.

211. Грабовська О. В. Дослідження стану води в крохмальних суспензіях та клейстерах / О. В. Грабовська, О. С. Парняков, В. А. Михайлик // Наукові праці ОНАХТ. – 2007. – Вип. 31, т.1. – С. 76-79.

212. Moebius, K. High-field EPR spectroscopy on proteins and their model systems / K. Moebius, A. Savitsky. – RSC Publishing, 2009. – 350 p. – ISBN: 0-8540-4368-3.

213. Погожих М. І. Дослідження системної води крохмалів тензометричним та ЕПР- методом / М. І. Погожих, А. О. Пак, А. В. Пак, О. С. Мольський // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2013 р. – № 2/1 (10). – С.31-35.

214. Погожих М. І. Дослідження стану вологи швидковідновлюваної каші методом ЕПР-спінових міток / М. І. Погожих, А. О. Пак, М. В. Жеребкін // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі. Економічна стратегія і перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг [Текст] : Міжнародна науково-практична конференція, 18 жовтня 2012р. : [присвячена 45-річчю ХДУХТ тези : у 2 ч.]. – Харків : ХДУХТ, 2012. – Ч.1. – С.425-427.

215. Погожих М. І. Исследования системной воды крахмалсодержащего сырья методом ЭПР-спиновых меток / М. І. Погожих, А. О. Пак // Материалы VIII Международной конференции «Проблемы промышленной теплотехники», 8-11 октября 2013 г. – Киев : ИТТФ. – 2013 г. – С.45-46.

216. Погожих М. І. Дослідження системної води модельних тіл із крохмалю тензометричним методом / М. І. Погожих, А. В. Пак, А. О. Пак // Вода в харчових продуктах і для харчових продуктів : всеукр. науково-практ. конф., 16-17 травня 2013 р. : [тези] / редкол. : О. І. Черевко [та ін.] ; Харк. держ. ун-т харч. та торгівлі. – Х. : ХДУХТ, 2013. – С. 59-60.

217. Погожих М. І. Дослідження гігроскопічних властивостей губки з кукурудзяного крохмалю / М. І. Погожих, А. О. Пак // Тези доповідей конференції «Прогресивні технології харчових виробництв, ресторанного та готельного господарства», 23-24 квітня 2009 р., РВВ ПУСКУ. – С.75-77.

218. Погожих М. І. Характер процесу ІНТМО за температури термостата більшої за температуру кипіння рідини у його внутрішньому середовищі / М. І. Погожих, А. О. Пак, А. В. Пак // Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини : Всеукр. наук.-практ. конф. присв. 50-річчю Харківського державного

університету харчування та торгівлі, 1-2 червня 2017 р. : [тези] / редкол. : О. І. Черевко [та ін.] ; Харк. держ. ун-т харч. та торгівлі. – Х. : ХДУХТ, 2017. – С. 45-46.

219. Погожих М. І. Дослідження характеру процесу ІНТМО за наявності розривів ККПТ всередині термостату / М. І. Погожих, А. О. Пак, М. В. Жеребкін // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність : Міжнародна науково-практична конференція, присвячена 50-річчю заснування Харківського державного університету харчування та торгівлі, 18 травня 2017 р. : [тези у 2-х ч.] / редкол. : О. І. Черевко [та ін.]. – Харків : ХДУХТ, 2017. – Ч. 1. – С. 316-317.

220. Погожих М. І. Дослідження особливостей процесу ІНТМО за умови створення границь розділу у вологому ККПТ / М. І. Погожих, А. В. Пак, А. О. Пак // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність : Міжнародна науково-практична конференція, присвячена 50-річчю заснування Харківського державного університету харчування та торгівлі, 18 травня 2017 р. : [тези у 2-х ч.] / редкол. : О. І. Черевко [та ін.]. – Харків : ХДУХТ, 2017. – Ч. 1. – С. 318-319.

221. Погожих М. І. Математична модель кінетики температури сировини під час ЗТП-сушіння / М. І. Погожих, А. О. Пак, М. А. Чеканов, М. В. Жеребкін // Вісник Національного технічного університету «ХП». Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях : зб. наук. праць / НТУ «ХП». – Харків : НТУ «ХП», 2011. – № 43. – С. 7–12.

222. Погожих М. І. Исследование кинетики температуры и кинетики сушки при получении быстровосстанавливаемой каши / М. І. Погожих, А. О. Пак, М. В. Жеребкін // Наукові праці ОНАХТ. – Серія: Технічні науки. – Одеса, 2009. – Вип. 35(35) – С. 101-104.

223. Погожих М. І. Внутрішні чинники процесу гідротермічної обробки круп з використанням принципів ЗТП-сушіння / М. І. Погожих, А.

О. Пак, Т. В. Мищенко, М. В. Жеребкін // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 5/3 (53). – С. 60–63.

224. Погожих М. І. Постановка задачи исследования развития диссипативных структур при сушке смешанным теплоподводом / М. І. Погожих, А. О. Пак // Современные энергосберегающие тепловые технологии (Сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ-2011 [Текст] : Труды четвертой Международной научно практической конференции, 20-23 сентября 2011г. – Москва : ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина», 2011. – Т.1. – С. 432-436.

225. Погожих М. І. Дослідження кінетики сушіння сировини при виробництві швидковідновлюваних каш / М.І. Погожих, А. О. Пак, М. В. Жеребкін // Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини [Текст] : Всеукр. науково-практ. конф., 3-4 листопада 2011р. : [тези] / редкол. : О. І. Черевко [та ін.] ; Харк. держ. ун-т харч. та торгівлі. – Х. : ХДУХТ, 2011. – С. 62-63.

226. Погожих М. І. Дослідження теплової дії на плодово-ягідну сировину під час ЗТП-сушіння зі штучним пороутворенням / М. І. Погожих, А. О. Пак, Я. В. Толстова // Тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції «Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини», 31 жовтня 2008 р. – Харків : ХДУХТ. – С.11-12

227. Бабенко В. В. Профили скорости в пограничном слое над пластиной с углублением / В В. Бабенко, А. В. Воскобойник, В А. Воскобойник, В. Н. Турик // Акустичний вісник. – 2004. – Т. 7. – №3. – С. 14-27. ISSN 1028 -7507

228. Терехов В. И. Вихревая картина турбулентного обтекания и теплообмен одиночного куба на плоской поверхности при различных углах атаки / В.И. Терехов, А.И. Гныря, С.В. Коробков // Теплофизика и аэромеханика. – 2010. – Т.17. – №4. – С. 521-533

229. Берже П. Порядок в хаосе. О детерминистическом подходе к турбулентности / П. Берже, И. Помо, К. Видаль. – М. : Мир. – 1991. – 368 с.
230. Ландау Л. Д Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1986. – 736 с.
231. Монин А. С. Статистическая гидромеханика. В 2-х ч. / А. С. Монин, А. М. Яглом – Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1992. – 695 с.
232. Falkovich Gregory. Lessons from hydrodynamic turbulence / Gregory Falkovich, K. R. Sreenivasan // *Physics Today*. – 2006. – №59 (4) – P. 43–49.
233. Брэдшоу П. Введение в турбулентность и ее измерение / П. Брэдшоу. – М. : «Мир», 1974. – 278 с.
234. Brykina I. G. Effective Boundary Conditions for Continuum Method of Investigation of Rarefied Gas Flow over Blunt Body / I. G. Brykina, B. V. Rogov, I. L. Semenov, G. A. Tirskiy // *Rarefied Gas Dynamics, 27th International Symposium. AIP conference proceedings, V. 1333, ed. by D. Levin, I. Wysong, A. Garcia. Melville.* – NY. – 2011. – P. 1289-1294.
235. Spalart P. R. Strategies for turbulence modelling and simulation / P. R. Spalart // *Intern. Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2000. – v. 21. – P. 252-263.
236. Breuer M. Comparison of DES, RANS and LES for the separated flow around a flat plate at high incidence / M. Breuer, N. Jovicic, K. Mazaev // *Int. J. Numer. Meth. Fluids*. – 2003. – v. 41. – P. 357-388.
237. Airframe, Volume 1: Structures. Third Edition / Aviation Maintenance Technician Series – Newcastle, Washington: Aviation Supplies & Academics, Inc. – 2006. – 490 p.
238. Погожих М. И. Влияние параметров движения сушильного агента на процесс сушки способом смешанного теплоподвода / М. И. Погожих, А. О. Пак // Проблемы ресурсо - и энергосберегающих технологий в промышленности и АПК : Международная научно-техническая конференция, 23-26 сентября 2014, Иваново : тезисы докладов. – Иваново, 2014. – С. 192-195.

239. Погожих М. І. Вплив параметрів руху сушильного агента на кінетику сушіння змішаним тепло підводом / М. І. Погожих, А. О. Пак, А. В. Пак, М. В. Жеребкін // ЕЕJET, Східно-європейський журнал передових технологій. – Харків, 2014. – № 2/12 (68). – С. 4-8.

240. Погожих М. І. Вплив параметрів руху сушильного агента на кінетику процесу ЗТП-сушіння / М. І. Погожих, Ж. В. Воронцова, А. О. Пак // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність : Міжнародна науково-практична конференція, 14 травня 2015 р. : [тези у 2-х ч.] / редкол. : О. І. Черевко [та ін.]. – Харків : ХДУХТ, 2015. – Ч. 1. – С. 295-297

241. Rockwell D. Vortex-body interactions / D. Rockwell. – Ann. Rev. Fluid Mech. – 1998 – №30. – P. 199–229.

242. Гиневский А. С. Акустическое управление турбулентными струями / А. С. Гиневский, Е .В. Власов, Р .К. Каравосов. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 240 с. – ISBN 5-9221-0116-7

243. Дяченко Э. П. Моделирование тепломассообмена при инфракрасной сушке сульфанола во вспененном состоянии / Э. П. Дяченко, В. В. Ермолаев, Т. Г. Васильева, Н. П. Васина // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2010. №2. С. 95-99  
URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-teplomassoobmena-pri-infrakrasnoy-sushke-sulfonola-vo-vспенennom-sostoyanii>

244. Бурдо О. Г. Проблемы моделирования процессов обезвоживания сырья / О. Г. Бурдо, С. Г. Терзиев, Н. В. Ружицкая, И. И. Яровой, А. А. Борщ // Наук. пр. ОНАХТ. – Одеса, 2012. – Вип. 41, Т.1. – С. 4-8.

245. Адамович А. Л. Моделирование тепловлагоденоса при конвективной и микроволновой сушке древесины / А. Л. Адамович, Ю. Г. Грозберг, О. А. Кизина, Н. Н. Гринчик, С. П. Кундас // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В: Промышленность. Прикладные науки. – № 8. – 2010. – С. 79-85. ISSN: 2070-1616



246. Платонов А. Д. Основы моделирования процесса конвективной сушки термохимически обработанной древесины / А. Д. Платонов // Научный журнал КубГАУ. – № 74(10). – 2011. – С. 1-9. Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2011/10/pdf/15.pdf> 1 УДК 65.011.56:630\*812.14

247. Курдюмов В. И. Тепловая обработка зерна в установках контактного типа: монография / В. И. Курдюмов, А. А. Павлушин, Г. В. Карпенко, С. А. Сутягин. – Ульяновск : УГСХА имени П.А. Столыпина, 2013. – 290 с.

248. Шутюк В.В. Математичне моделювання сушіння харчових продуктів перегрітою парою / В.В. Шутюк, С.М. Василенко, О.С. Бесараб // Наукові праці НУХТ. – К. : НУХТ, 2013. – №49. – 84-87.

249. Кіндзера Д. П. Моделювання тепло-масообмінних процесів під час фільтраційного сушіння струганого березового шпону / Д. П. Кіндзера, В. М. Атаманюк, Б. М. Микичак, О. В. Уткіна // Вісн. Нац. ун-ту «Львів. політехніка». – 2014. – №787. – С. 319-323.

250. Гайвась Б. Математичне моделювання конвективного сушіння матеріалів з урахуванням механотермодифузійних процесів / Б. Гайвась // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. – 2010. – вип. 12. – С. 9-37. ISSN 1816-1545

251. Kumar A. Implicit boundary method for finite element analysis using non-conforming mesh or grid / A. Kumar, S. Padmanabhan, R. Burla // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 2008. – Vol. 74 (9). – P. 1421–1447.

252. Демьянов В. Ф. О прямых методах решения вариационных задач / В. Ф. Демьянов, Г.Ш. Тамасян // Труды института математики и механики УрО РАН. – 2010. – Том 16 № 5– С. 36-47.

253. Trefethen Lloyd N. Numerical Analysis / Lloyd N. Trefethen // Princeton Companion of Mathematics. – Princeton University Press. – 2006. – 20 p.

254. Dey TK. Provable surface reconstruction from noisy samples / TK. Dey, S. Goswami // Proceedings of the twentieth annual symposium on computational geometry. – 2004. – New York (NY, USA): ACM. – P. 330-339.

255. Рвачев В. Л. Теория R-функций и некоторые ее приложения / В. Л. Рвачев – Киев: Наук. думка, 1982. – 552 с.

256. Shapiro V. Semi-analytic geometry with R-Functions / V. Shapiro // Acta Numerica, Cambridge University Press. – 2007.– vol. 16. – P. 239-303.

257. Погожих М. І. Використання числових методів для дослідження математичних моделей сушіння / М. І. Погожих, М. С. Синькоп, А. О. Пак // Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини :Всеукр. наук.-практ. конф. до 25-річчя факультету обладнання та технічного сервісу ХДУХТ, 29 жовтня 2015 р. : [тези] / редкол. : О. І. Черевко [та ін.] ; Харк. держ. ун-т харч. та торгівлі. – Х. : ХДУХТ, 2015. – С. 13-14.

258. Погожих М. І. Наближений розв'язок задач теорії сушіння капілярно-пористих тіл складної форми / М. І. Погожих, М. С. Синькоп, Д. О. Торяник, А. О. Пак // Science Rise – №3/2 (20). – 2016. – С.6-11

259. Погожих М. І. Структура розв'язання задач теорії сушіння капілярно-пористих тіл складної форми / М. І. Погожих, М. С. Синькоп, А. О. Пак // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність : Міжнародна науково-практична конференція, 19 травня 2016 р. : [тези у 2-х ч.] / редкол. : О. І. Черевко [та ін.]. – Харків : ХДУХТ, 2016. – Ч. 1. – С. 369-370.

260. Лыков А. В. Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, Ю. А. Михайлов. – Москва – Ленинград : Государственное энергетическое издательство, 1963. – 535 с.

261. Максименко-Шейко К. В. R-функции в математическом моделировании геометрических объектов в 3D по информации в 2D / К. В. Максименко-Шейко, Т. И. Шейко // Вісник Запорізького національного університету. – 2010. – №1. – С. 98-104.

262. Balabanian N. Digital logic design principles / Norman Balabanian, Bradley Carlson // John Wiley. – 2001. – P. 39-40.

263. Максименко-Шейко К. В. R-функции и обратная задача аналитической геометрии в трехмерном пространстве / К. В. Максименко-Шейко, А. М. Мацевитый, А. В. Толок, Т. И. Шейко // Информационные технологии. – 2007. – №10. – С. 23-32.

264. Hernandez M. A. Chebyshev's approximation algorithms and applications / M.A. Hernandez // Comp. Math. Applic. – 2001. – № 41. – P. 433-445.

265. Михлин С.Г. Вариационные методы в математической физике / С.Г. Михлин. – М.: Наука. – 1970. – 512 с.

266. Лобанова Л. С. Нестационарные динамические задачи термоупругости в двухмерных областях / Л. С. Лобанова, Н. С. Синеккоп // Проблемы машиностроения. – 2001. – Том 4, №1-2. – С.108.

267. Гуляев В. И. Прикладные задачи теории нелинейных колебаний механических систем / В. И. Гуляев, В. А. Баженов, С. Л. Попов. – М. : Высшая школа, 1989. – 383 с. – ISBN 5-06-000091-5.

268. Yousef Saad. Iterative Methods for Sparse Linear Systems : 2nd edition / Saad. Yousef. – SIAM. – 2003. – 547 p. ISBN 978-0-89871-534-7 (<http://dx.doi.org/10.1137/1.9780898718003>)

269. Броунштейн Б. И. Гидродинамика, массо- и теплообмен в колонных аппаратах / Б. И. Броунштейн, В. В. Щеголев. – Л. : Химия, 1988. – 336 с. ISBN 5-7245-0100-7

270. Погожих М. І. Сумісне використання R-функцій і проєкційного методу в задачах теорії сушіння / М. І. Погожих, М. С. Синеккоп, А. О. Пак, М. А. Чеканов / Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. пр. / [редкол. : О. І. Черевко (відпов. ред.) та ін.]. – Харків : ХДУХТ, 2016. – Вип. 1(23) – С. 284-293

271. Погожих М. І. Функція розподілення потужності дисипативних структур всередині ФЄ під час ЗТП-сушіння / М. І. Погожих, А. О. Пак, М. В.

Жеребкін // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 2/12 (56). – С. 59–63.

272. Самарский А. А. Вычислительная теплопередача / А. А. Самарский, П. Н. Вабищевич. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.

273. Тихонов А. Н. Дифференциальные уравнения / А. Н. Тихонов, А. Б. Васильева, А. Г. Свешников. – М. : «Наука», 1980. – 231с.

274. Кошляков Н. С. Уравнения в частных производных математической физики / Н. С. Кошляков, Э. Б. Глинер, М. М. Смирнов. – М. : «Высшая школа», 1970. – 712с.

275. Погожих М. І. Дослідження плинну вологої сировини в функціональній ємності прямокутного перерізу / М. І. Погожих, А. О. Пак, М. В. Жеребкін // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2009. – № 6/5 (42). – С. 56–59.

276. Погожих М. І. Математична модель кінетики температури сировини під час ЗТП-сушіння / М.І. Погожих, А.О. Пак, М.В. Жеребкін // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність : Міжнародна науково-практична конференція, 14 травня 2015 р. : [тези у 2-х ч.] / редкол. : О. І. Черевко [та ін.]. – Харків : ХДУХТ, 2015. – Ч. 1. – С. 298-299.

277. Погожих М. І. Функція розподілення потужності дисипативних структур в сировині під час ЗТП-сушіння / М. І. Погожих, А. О. Пак // Матеріали Міжнародної наукової конференції «Наукова періодика слов'янських країн в умовах глобалізації». – Київ, 2012. – Ч.1. – Том. Промислові технології. – С. 19-21.

278. Погожих М.І., Пак А.О., Пак А.В., Жеребкін М.В. Технічна реалізація апаратів з використанням процесу індукованого тепломасообміну / М. І. Погожих, А. О. Пак, А. В. Пак, М. В. Жеребкін // Science Rise – № 6(35). – 2017. – С. 29–33

279. Погожих М. І. Установа для зневоднення рослинної сировини з використанням принципів сушіння змішаним тепло підводом / М. І.

Погожих, А. В. Пак, А. О. Пак // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність : Міжнародна науково-практична конференція, 22 травня 2014 р. : [тези у 2-х ч.] / редкол. : О. І. Черевко [та ін.]. – Харків : ХДУХТ, 2014. – Ч. 1. – С.287-288.

280. Погожих М. І. Шляхи підвищення якості швидко відновлювальних продуктів харчування, які отримують з використанням сушіння змішаним тепло підводом / М. І. Погожих, А. О. Пак, М. В. Жеребкін // Матеріали VI міжнародної конференції «Strategy of Quality in Industry and education» : 4-11 червня 2010 р., Варна, Болгарія. – Т.1. – Ч.1. – С. 422-423

281. Кретов И. Т. Технологическое оборудование предприятий пищекоцентрационной промышленности / И. Т. Кретов, А. Н. Остриков. – Воронеж: Издательство Воронежского университета, 2005. – 448с.

282. Дубровская Э. Технология производства продуктов переработки зерна / Э. Дубровская, Е. Риженко, А. Абикенова. – Астана : Фолиант, 2008. – 300 с.

283. Зверев С. В. Физические свойства зерна и продуктов его переработки / С. В. Зверев, Н. С. Зверева. – М. : ДеЛи принт 2007. – 176с.

284. Погожих М. І. Способ и установка для получения быстровосстанавливаемых каш с использованием принципов СТП-сушки / М. І. Погожих, А. О. Пак, М. В. Жеребкін // Труды международного научно-технического семинара «Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов» : 11-13 мая 2010г.: ГОУ ВПО «ВГЛТА» : Воронеж, 2010. – С. 220-223

285. Пат. на корисну модель 48230 Україна, МПК А 23 L 3/00. Установка для гідротермічної обробки та сушіння крупи / Черевко О. І., Погожих М. І., Жеребкін М. В., Пак А. О., Цуркан М. М. ; заявник та патентовласник Харк. держ. ун-т харч. та торг. – № U2009 09646 ; заявл. 21.09.2009 ; опубл. 10.03.2010, Бюл. № 5. – 2 с.

286. Постнов Г. М. Визначення енергії ультразвукових коливань, що розсіялась під час ультразвукової обробки м'ясної сировини / Г. М. Постнов, А. О. Пак, М. А. Чеканов // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: Зб. наук. праць/ Редкол.: О.І. Черевко (відпов. ред.) та ін.; Харк. Держ. Ун-т харчування та торгівлі. – Харків, 2009. – Вип. 1 – с.518-523.

287. Погожих М. І. Концепція підвищення енергоефективності технологічних процесів харчових виробництв / М. І. Погожих, М. А. Чеканов, А. О. Пак / Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. пр. / [редкол. : О. І. Черевко (відпов. ред.) та ін.]. – Харків : ХДУХТ, 2015. – Вип. 1(21) – С. 139-147.

288. Погожих М. І. Оцінювання ефективності використання енергії / М. І. Погожих, А. О. Пак, М. А. Чеканов // Прогресивна техніка та технології харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі. Економічна стратегія і перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг : Міжнародна науково-практична конференція, 19 листопада 2013 р. : [присвячена 75-річчю з дня народження ректору університету (1988-1991 рр.), д-ра техн. наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ Беляєва Михайла Івановича : тези у 2 ч.] / редкол. : О. І. Черевко [та ін.] ; Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. – Х. : ХДУХТ, 2013. – Ч.1. – С. 424-425.

289. Петрушевский В.В. Производство сахаристых веществ. / В.В. Петрушевский, Е.Г. Бондарь, Е.В. Винокурова. – К. : Урожай, 1989. – 168 с. ISBN 5-337-00407-7

290. Smith Michael B. March's Advanced Organic Chemistry: Reactions, Mechanisms, and Structure, Sixth Edition / Michael B. Smith, Jerry March. – Available at: <http://rushim.ru/books/mechanizms/march6ed.pdf>

291. Растительный белок / Пер. с фр. В.Г. Долгополова; Под ред. Т.П. Микулович. – М. : Агропромиздат, 1991. – 684 с.

292. Пищевая химия / под ред. А.П. Нечаева. – СПб. : ГИОРД, 2004. – 640 с.

293. Погожих М. І. Практична значимість математичної моделі розподілення потужності дисипативних структур під час ЗТП-сушіння / М. І. Погожих, А. О. Пак, М. В. Жеребкін // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність : Міжнародна науково-практична конференція, 22 травня 2014 р. : [тези у 2-х ч.] / редкол. : О. І. Черевко [та ін.]. – Харків : ХДУХТ, 2014. – Ч. 1. – С.285-286.

294. Чеботарев О. Н. Гидротермическая обработка как средство оптимизации технологических свойств зерна / О. Н. Чеботарев, Ж. П. Соловьева // Изв. вузов. Пищевая технология. – 2005. – №5-6. – С.15-17.

295. Доронин А. Ф. Особенности экструзионной технологии при производстве пищевых продуктов / А. Ф. Доронин, М. А. Климова // Вестник Университета пищевых производств – М. : МГУПП, 1997. – 20 с.

296. Пат. №2459425, МПК А 23 L 1/10, А 23 L 1/164, А 23 L 1/0522, А 23 L 1/18, А 23 L 1/308 Вспученные экструдированные зерновые продукты с богатым источником пищевого волокна / Четел Р. (US), Мьюи С. (US), Френч Д. (US) ; заявл. 20.10.2009 ; опубл. 27.08.2012. – 9с.

297. Пат. №2067399 РФ, МПК А 23 L 1/164, А 23 L 1/18, А 23 L 1/168 Способ изготовления готового к употреблению крупяного продукта / Жуан де Алмейда [PT] ; заявл. 17.07.1992 ; опубл. 10.10.1996. – 4с.

298. Пат. №2281004 RU, МПК А 23 L 1/164, 1/18,1/168 Способ получения пищевого продукта из зерновых культур / Бастриков Д. Н. (RU), Панкратов Г. Н. (RU) ; заявл. 19.10.2005 ; опубл. 13.06.2006 – 4с.

299. Пат. №2294650 RU, МПК А 23 L 1/10, А 23 L 1/18 А 23 L 1/182 (2006.01) Способ получения сушеного альфа-риса с помощью вакуумной сушки / Чхой Чхулбэ (KR), Чхой Кхюсик (KR), Чхой Кхюнхо (KR), Хан Кхвансун (KR), Ан Хваджин (KR) ; заявл. 21.04.2003 ; опубл. 27.10.2005. – 11с.

300. Сборник рецептур блюд и кулинарных изделий: Для предприятий обществ. питания. / Авт.-сост. : А.И. Здобнов, В.А. Цыганенко. – К. : ООО «Издательство Арий», М. : ИКТЦ «Лада», 2009. – 680 с.

301. Афанасьев М. В. Оцінка ефективності організаційно технічних заходів : навч. посіб / М. В. Афанасьєв, Л. І. Телишевська, В. І. Рудика. – Х. : ІНЖЕК, 2003. – 287 с.

302. Вовчак О. Д. Інвестування : навч. посіб. / О. Д. Вовчак. – Львів : Новий світ-2000, 2008. – 544 с.

303. ДСТУ 1055:2006 «Крупи, що швидко розварюються». – Київ : Держспоживстандарт України, Видання офіційне, 2007. – 12 с.

304. Погожих М. І. Дослідження умов зберігання та показників якості швидковідновлювальних каш, отриманих сушінням змішаним теплопідводом / М. І. Погожих, А. О. Пак, М. В. Жеребкін // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства та торгівлі : зб. наук. праць / ХДУХТ. – Харків : ХДУХТ, 2011. – Вип. 1 (13). – С. 21–26.

305. Погожих М. І. Пористість швидковідновлювальної каші, отриманої сушінням змішаним теплопідводом / М. І. Погожих, А. О. Пак, М. В. Жеребкін // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій : зб. наук. праць / ОНАХТ. – Одеса : ОНАХТ, 2011. – Вип. 40. – Том 1. – С. 54–57.

306. Погожих М. І. Визначення умов зберігання швидковідновлювальних каш, отриманих сушінням змішаним теплопідведенням / М. І. Погожих, А. О. Пак, М. В. Жеребкін // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі. Економічна стратегія і перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг [Текст] : Міжнародна науково-практична конференція, 19 травня 2011р. : [тези : у 4 ч.]. – Харків : ХДУХТ, 2011. – Ч.2. – С.85-86

307. Потапов В. О. Структурно-енергетичний метод аналізу ізотерм сорбції-десорбції харчової сировини / В. О. Потапов // Прогресивні техніка та



технології харчових виробництв, ресторанного господарства та торгівлі : Зб. наук. пр. Харків : ХДУХТ, 2005. – Вип.1. – С.313-322.

308. Гинзбург А. С. Теплофизические свойства зерна, муки и крупы / А. С. Гинзбург, М. А. Громов. – М. : Колос, 1984. – 304 с.

309. Лаврушина Ю. А. Исследование сорбционных свойств и химического состава крупяных изделий / Ю. А. Лаврушина, Р. А. Филичкина, А. А. Иванова, О. А. Шпигун // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2000. – № 2. – С.52-53.

310. Иунихина В. Крупяные продукты быстрого приготовления / В. Иунихина, Е. Мельников // Хлебопродукты. – 2006. – №1. – С.30-32.

311. Егоров Г. А. Управление технологическими свойствами зерна / Г. А. Егоров. – М. : Колос, 2000. – 348 с.

312. Державні санітарні норми та правила «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» (ДСанПіН 2.2.4-171-10) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10>

313. Державні гігієнічні нормативи «Допустимі рівні вмісту радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  у продуктах харчування та питній воді» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0845-06>

314. Державні санітарні норми та правила «Медичні вимоги до якості та безпечності харчових продуктів та продовольчої сировини» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/z0088-13>

315. «Медико-биологические требования и санитарные нормы качества продовольственного сырья и пищевых продуктов» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/v5061400-89>

316. Кардин С. Цветовой аспект качества / С. Кардин // Продукты и ингредиенты. – 2008. – № 9. – С. 12-13.

317. Цветометрия – новый метод контроля качества пищевой продукции / О. В. Байдичева и др. // Пищевая промышленность. – 2008. – № 5. – С. 20-22.

318. Колориметрические цветовые системы и модели [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.RealColor.ru>

319. Рошаль А. Д. Разноцветная история / А. Д. Рошаль // Universities. – 2004. – № 2. – С. 14-23.

320. Джад Д. Цвет в науке и технике / Д. Джад, Г. Вышецки ; пер. с англ. под ред. Л. Ф. Артюшина. – М. : Мир, 1978. – 592 с.

321. Міщенко Т. В. Колориметричне дослідження сушеної чорної смородини / Т. В. Міщенко, М. І. Погожих, А. О. Пак // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: Зб. наук. праць/ Редкол.: О.І. Черевко (відпов. ред.) та ін. – Харків, 2009. – Вип. 2 – С. 436-442.

322. ГОСТ 24556-89. «Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения витамина С» (СТ СЭВ 6245-88). – М. : Изд-во стандартов. 1989. – 18с.

323. Бурдо О. Г. Выпаривание пищевых жидкостей в термомеханическом агрегате на базе вращающегося термосифона / О. Г. Бурдо, И. В. Безбах, Саид Ахмед Омар // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – 2010. – Вип. 37. – С. 85-88. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Np\\_2010\\_37\\_24](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Np_2010_37_24)

324. Процеси і апарати харчових виробництв : Підручник / за ред. проф. І. Ф. Малежика. – К. : НУХТ, 2003. – 400 с.

325. Черевко О. І. Процеси і апарати харчових виробництв: Підручник / О. І. Черевко, А. М. Поперечний. – Харків : ХДАТОХ, 2002. – 420 с.

326. Павлюк Р. Ю. Активация растительных биологически активных веществ физическими методами : монографія / Р. Ю. Павлюк, Н. В. Дібрівська, В. А. Павлюк, В. В. Яницький, Т. В. Крячко – Х. : ХДУХТ, 2010. – 152 с.

327. Дубініна А. А. Характеристика пігментного комплексу столового буряку та закономірності змін його кольору / А. А. Дубініна, Н. М. Пенкіна, Н. І. Черевична, В. С. Ольховська // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – №4/10 (64). – 2013. – С. 43-47.

## ДОДАТКИ

## **ДОДАТОК А**

### **Патенти України на корисну модель**

- А.1. №87562 «Спосіб дослідження динамічної поведінки  
вологи в капілярно-пористих колоїдних матеріалах  
методом  
ЕПР-спінових міток під час сушіння»**
- А.2. №48230 «Установка для гідротермічної обробки та  
сушіння крупи»**





ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **87562** (13) **U**  
(51) МПК  
**G01N 24/10** (2006.01)

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

<p>(21) Номер заявки: <b>u 2013 10871</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>10.09.2013</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: <b>10.02.2014</b></p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: <b>10.02.2014, Бюл.№ 3</b></p>	<p>(72) Винахідник(и): <b>Погожих Микола Іванович (UA), Ромоданов Ігор Сергійович (UA), Пак Аліна Володимирівна (UA), Пак Андрій Олегович (UA)</b></p> <p>(73) Власник(и): <b>ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧУВАННЯ ТА ТОРГІВЛІ, вул. Клочківська, 333, м. Харків, 61051 (UA)</b></p>
---	--

**(54) СПОСІБ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ ВОЛОГИ В КАПІЛЯРНО-ПОРИСТИХ КОЛОЇДНИХ МАТЕРІАЛАХ МЕТОДОМ ЕПР-СПІНОВИХ МІТОК ПІД ЧАС СУШІННЯ**

(57) Реферат:

Спосіб дослідження динамічної поведінки вологи в капілярно-пористих колоїдних матеріалах під час сушіння включає розміщення вологого зразка матеріалу в середовищі із заданою відносною вологістю та температурою. При цьому вологий зразок матеріалу розміщують у резонаторі ЕПР-спектрометра та висушують до рівноважного вологовмісту, реєструють масу зразка й ЕПР-сигнал, та за площами під сигналами, які пропорційні кількості вологи, що виконує роль розчинника, та кількості вологи, що не є розчинником, визначають відповідні кількості вологи і форми зв'язку її з матеріалом.

UA 87562 U

Корисна модель належить до харчової промисловості, а саме до дослідження та аналізу властивостей капілярно-пористих колоїдних матеріалів, до яких належить більша частина харчової сировини та продуктів, і може бути використаний в переробній галузі сільськогосподарської продукції, харчоконцентратній та харчовій галузях промисловості.

5 Відомі способи дослідження вологи в капілярно-пористих колоїдних матеріалах, що включають термодинамічні або молекулярно-кінетичні методи отримання інформації про її фракційний склад [1, 2].

Недоліком цих способів є велика тривалість проведення вимірювань, недостатня чутливість до кількості та стану вологи, складні інтерпретація та аналіз експериментальних даних і низька кореляція результатів, отриманих різними способами.

10 Найбільш близьким технічним рішенням до корисної моделі є спосіб визначення фракційного складу вологи в матеріалах [3], який полягає в наступному. Зразок поміщають в піч дериватографа із заданою відносною вологістю та температурою в ній. Висушують та за результатами дериватографічного аналізу будують залежність логарифму швидкості зневоднення від зворотного значення абсолютної температури зразка, визначають точки залому на отриманому графіку та відповідні значення втрати вологи на дериватограмі.

15 Недоліком цього способу дослідження системної вологи капілярно-пористих колоїдних матеріалів є те, що він являється по суті термодинамічним способом, при цьому інформація про стан молекул води в матеріалі отримується не в явному вигляді, а за допомогою розрахунків.

20 В основу корисної моделі поставлена задача розробити спосіб дослідження динамічної поведінки вологи в капілярно-пористих колоїдних матеріалах під час сушіння, до складу якого входили б термодинамічні та молекулярно-кінетичні методи дослідження, а отримана інформація була б поєднанням експериментальних даних отриманих за їх допомогою, шляхом використання методу ЕПР-спінових міток (ЕПР - електронний парамагнітний резонанс).

25 Поставлена задача вирішується тим, що у відомому способі визначення фракційного складу вологи в матеріалах, який включає розміщення вологого зразка матеріалу в середовище із заданою відносною вологістю та температурою, згідно з корисною моделлю, вологий зразок матеріалу розміщують у резонатор ЕПР-спектрометра та висушують до рівноважного вологовмісту, при цьому реєструють масу зразка й ЕПР-сигнал, та за площами під сигналами, які пропорційні кількості вологи, що виконує роль розчинника, та кількості вологи, що не є розчинником, визначають відповідні кількості вологи і форми зв'язку її з матеріалом.

30 Спосіб здійснюється наступним чином. Досліджуваний вологий зразок розміщується в резонатор ЕПР-спектрометра та висушується до рівноважного вологовмісту потоком підігрітого до визначеної температури повітря. В процесі зневоднення фіксується маса зразка та безперервно реєструється ЕПР-сигнал спініченого зразка.

35 Як спінова мітка під час ЕПР досліджень використовується іон  $Mn^{2+}$  солі  $MnSO_4$ . Спінова мітка вводиться в досліджуваний зразок, який є капілярно-пористим колоїдним матеріалом, шляхом використання як зволожуючої рідини розчину солі  $MnSO_4$  відповідної концентрації.

40 На кресленнях представлено: фіг. 1 - ЕПР-спектри для: а - порошку солі  $MnSO_4$ ; б - її розчину; с - зразка капілярно-пористого колоїдного матеріалу; на фіг. 2 - площа під 6-піковим (а) та 1-піковим (б) ЕПР-сигналом для зразка модельного капілярно-аористого колоїдного матеріалу під час сушіння.

45 Спектр ЕПР спініченого матеріалу (Фіг. 1а) складається з двох: спектр, який представляє собою 6 піків однакової ширини (Фіг. 1б), та спектр, який складається із однієї широкої лінії (Фіг. 1с). 6-піковий спектр - це спектр, який дає іон  $Mn^{2+}$  солі  $MnSO_4$ , коли сіль знаходиться в розчиненому стані; 1-піковий - відповідає кристалічному стану солі  $MnSO_4$ .

З теорії методу ЕПР [4], відомо, що спектри із 1 піка та із 6 піків можуть бути описані рівняннями Гауса (1) та Лоренца (2), які мають вид:

$$I_G = I_0^G \cdot \exp\left(-\frac{(H-H_0)^2}{\Delta H_G^2}\right), \quad (1)$$

$$50 \quad I_L = I_0^L \cdot \left(1 + \frac{(H-H_0)^2}{\Delta H_L^2}\right)^{-1}, \quad (2)$$

де  $I_G, I_L$  - поточне значення інтенсивності сигналу;  $I_0^G, I_0^L$  - максимальне значення інтенсивності сигналу;  $H, H_0$  - поточне значення напруженості магнітного поля та значення напруженості, за якої сигнал має максимум;  $\Delta H_G^2, \Delta H_L^2$  - ширина лінії.



Наступним кроком знаходять основні параметри досліджуваних ліній (спектрів порошку солі  $\text{MnSO}_4$  та її розчину), а саме: інтенсивність ( $I_0$ ), значення напруженості магнітного поля, за якого спостерігається максимум лінії поглинання ( $H_0$ ), ширину лінії ( $\Delta H$ ). Функція (3), що описує спектр порошку солі  $\text{MnSO}_4$ , складається з однієї функції виду (1) або (2), а функція (4) для її розчину - із шести, кожна з яких має свою величину  $H_0$ :

$$f_{1p}(H, I_0^{1p}) = I_0^{1p} \cdot e^{-\frac{(H-H_0^{1p})^2}{\Delta H_{1p}^2}},$$

$$f_{1p}(H, I_0^{1p}) = I_0^{1p} \cdot \left(1 + \frac{(H-H_0^{1p})^2}{\Delta H_{1p}^2}\right)^{-1}; \quad (3)$$

$$f_{6p}(H, I_0^{6p}) = \sum_{k=1}^6 I_0^{6p} \cdot e^{-\frac{(H-H_0^{6p})^2}{\Delta H_{6p}^2}},$$

$$f_{6p}(H, I_0^{6p}) = \sum_{k=1}^6 I_0^{6p} \cdot \left(1 + \frac{(H-H_0^{6p})^2}{\Delta H_{6p}^2}\right)^{-1}; \quad (4)$$

де індекс  $1p$  - для широкої лінії, а  $6p$  - для спектра із 6 піків.

Функція  $f_{\text{ККРТ}}(H, I_0^{1p}, I_0^{6p})$  для вологого досліджуваного зразка знаходиться як сума функцій для порошку солі  $\text{MnSO}_4$  та її розчину:

$$f_{\text{ККРТ}}(H, I_0^{1p}, I_0^{6p}) = f_{1p}(H, I_0^{1p}) + f_{6p}(H, I_0^{6p}). \quad (5)$$

Апроксимація вибраною функцією отриманих експериментальних даних для досліджуваного зразка проводиться шляхом варіювання значеннями амплітуд вихідних функцій  $I_0^{1p}$  та  $I_0^{6p}$ . Визначені амплітуди використовуються для знаходження площ під функцією, що описує 15  
одиночну лінію, та під функцією із шести піків. Площа під спектром розраховується як інтеграл від аналітичних функцій у нескінченних границях:

$$S_{1p} = \int_{-\infty}^{+\infty} f_{1p}(H, I_0^{1p}) dH, \quad (6)$$

$$S_{6p} = \int_{-\infty}^{+\infty} f_{6p}(H, I_0^{6p}) dH. \quad (7)$$

Вважається, що площа під 6-піковим сигналом ( $S_{6p}$ ) пропорційна кількості спінів електронів  $\text{Mn}^{2+}$ , які знаходяться в розчині, а площа під 1-піковим ( $S_{1p}$ ) - кількості спінів електронів  $\text{Mn}^{2+}$ , які випали в осад через недостатню кількість розчинника. Якщо досліджуваний зразок капілярно-пористого колоїдного матеріалу, сигнал ЕПР якого описується функцією (5), висушувати, то внаслідок зневоднення площа  $S_{1p}$  буде збільшуватися, а  $S_{6p}$  - зменшуватися. Пояснюється це тим, що кількість води, яка може бути розчинником, зменшується, а кількість солі  $\text{MnSO}_4$ , яка випала в осад, - збільшується. По мірі висушування сигнал із шести піків перетвориться в сигнал, що представляє собою широку лінію. За характером залежностей розрахованих площ від вологовмісту зразка можна зробити висновок про те, яка саме за формою зв'язку волога видалається на тій, чи іншій ділянці.

Таким чином, розраховуючи площі під сигналами в процесі сушіння вологого зразка та будуючи залежності цих площ від вологовмісту зразка, можна дослідити процес видалення розчинника із найближчого оточення мітки, тобто іона  $\text{Mn}^{2+}$ .

На фігурі 2 наведено приклад отримуваних залежностей для зразка модельного капілярно-пористого колоїдного матеріалу.

З наведених залежностей видно, що для 6-пікового сигналу (Фіг. 2а): за зменшення вологовмісту, відносно початкового,  $S_{6p}$  зменшується до досягнення певних величин вологовмісту, за яких мають місце локальні мінімум та максимум кривої. При подальшому зменшенні вологовмісту локальних екстремумів немає. Для 1-пікового сигналу (Фіг. 2б) залежність зворотна.

Кожну із кривих можна розбити на 4 характерні ділянки.

## UA 87562 U

На першій ділянці відбувається інтенсивне видалення вологи з поверхні матеріалу та нагрівання зразка сушильним агентом. Через зменшення кількості системної вологи, зменшується кількість солі, яка знаходиться в розчині, результатом чого є зменшення  $S_{бр}$  та збільшення  $S_{1р}$ .

5 На другій ділянці видалення вологи продовжується, але розчинна здатність системної вологи збільшується через підвищення температури і кількість розчиненої солі  $MnSO_4$ , а, відповідно, і іонів  $Mn^{2+}$  в розчині, зростає. В результаті цього  $S_{бр}$  збільшується, а  $S_{1р}$  - зменшується.

10 Третя ділянка відповідає видаленню вологи змочування:  $S_{бр}$  монотонно зменшується, а  $S_{1р}$  - монотонно збільшується.

На четвертій ділянці відбувається збільшення кута нахилу кривої до осі вологовмісту. Пояснюється це тим, що мітка, тобто іон  $Mn^{2+}$ , є найбільш чутливою до найближчого свого оточення, а оскільки характер кривих стає більш різким, то це свідчить про видалення вологи із макро- та мікрокапілярів, а також частини вологи полімолекулярної сорбції.

15 Оскільки дослідження вологи проводиться у даному випадку непрямым способом, тобто досліджується стан та оточення мітки, то на перших двох ділянках аналіз експериментальних даних ускладнений зміною розчинності солі  $MnSO_4$ . Таким чином, дослідження системної вологи проводиться лише на третій та четвертій ділянках, причому окремо для кожної ділянки, оскільки чутливість мітки на них різна.

20 ПІР спектри отримувались під час сушіння вологих зразків, тобто досліджувалась кінетика процесу видалення вологи, тому кількість молів води на третій та четвертій ділянках можна визначити за формулами:

$$v_{w3}(\tau) = v_{w3}(\tau) \cdot A_{13}(v_{w3}) + v_{w3}(\tau) \cdot A_{23}(v_{w3})$$

$$v_{w4}(\tau) = v_{w4}(\tau) \cdot A_{14}(v_{w4}) + v_{w4}(\tau) \cdot A_{24}(v_{w4})$$

25 де А з індексом "1" відповідає частині вологи, яка є розчинником, а з індексом "2" - частині води, яка не розчиняє сіль  $MnSO_4$ .

Коефіцієнти А є тангенсами кута нахилу апроксимаційних прямих на відповідних ділянках кривих, які описують зміну площі під 6-піковим та 1-піковим ЕПР-сигналами під час сушіння вологого зразка:

$$A_{13} = \operatorname{tg}\alpha_{13}; A_{14} = \operatorname{tg}\alpha_{14};$$

$$A_{23} = \operatorname{tg}\alpha_{23}; A_{24} = \operatorname{tg}\alpha_{24}.$$

30 Приклад знаходження апроксимаційних прямих наведених на фігурі 2.

Таким чином, до складу запропонованого способу дослідження динамічної поведінки вологи в капілярно-пористих колоїдних матеріалах методом ЕПР-спінових міток під час сушіння входять термодинамічний та молекулярно-кінетичний методи дослідження, а отримана інформація є поєднанням експериментальних даних, отриманих за їх допомогою.

35 Джерела інформації:

1. Д. Эйзенберг, В. Кауцман Структура и свойства воды. - Ленинград: Гидрометеоиздат, 1975 г. - 280 с.

2. Вода в пищевых продуктах и для пищевых продуктов: Монография / гл. редактор Н.И. Погожих; Харьк. гос. ун-т пит. и торговли. - Х.: ХГУПТ, 2013. - 177 с.

40 3. Пат. РФ № 2296974 МПК G01N 15/00 Способ определения фракционного состава влаги в материалах / В.М. Арапов (RU), М.В. Мамонтов (RU), М.В. Арапов (RU). - Заявл. 19.07.2005; Оubl. 10.04.2007; Бюл. № 13. - 5 с.

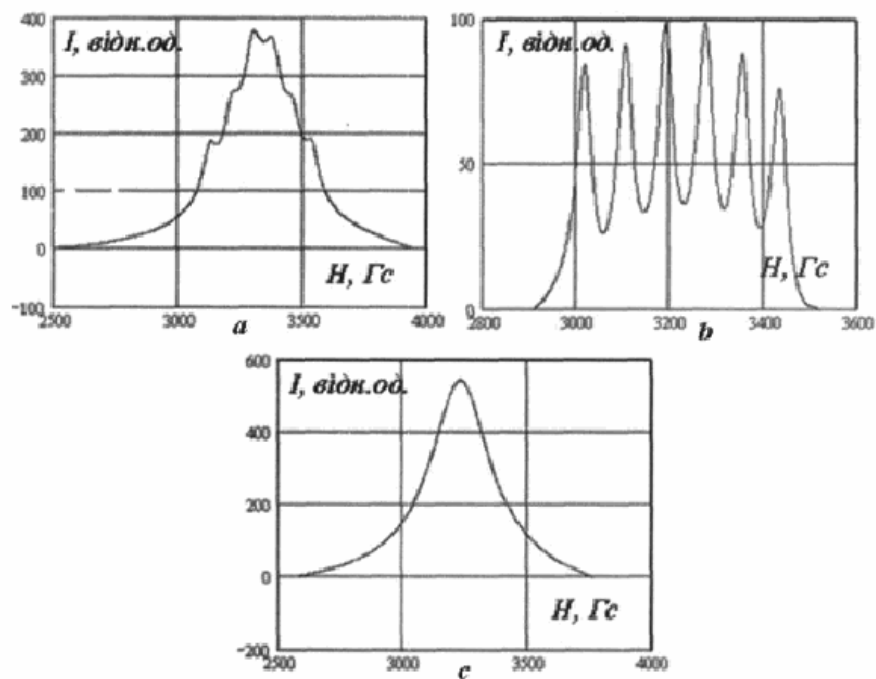
4. Дж. Вертц, Дж. Болтон Теория и практические приложения метода ЭПР. - М.: Издательство "Мир", 1975 г. - 550 с.

45

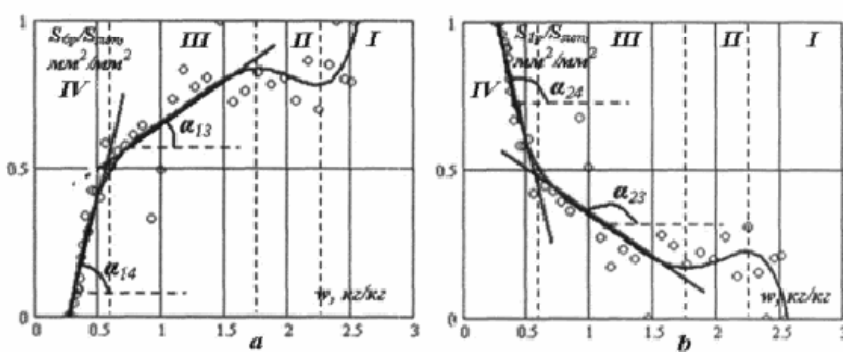
#### ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

50 Спосіб дослідження динамічної поведінки вологи в капілярно-пористих колоїдних матеріалах під час сушіння, що включає розміщення вологого зразка матеріалу в середовищі із заданою відносною вологістю та температурою, який **відрізняється** тим, що вологий зразок матеріалу розміщують у резонаторі ЕПР-спектрометра та висушують до рівноважного вологовмісту, при цьому реєструють масу зразка й ЕПР-сигнал, та за площами під сигналами, які пропорційні кількості вологи, що виконує роль розчинника, та кількості вологи, що не є розчинником, визначають відповідні кількості вологи і форми зв'язку її з матеріалом.

UA 87562 U



Фиг. 1



Фиг. 2

Комп'ютерна верстка І. Скворцова

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601



## НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 48230

УСТАНОВКА ДЛЯ ГІДРОТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ТА  
СУШІННЯ КРУПИ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 10.03.2010.

Голова Державного департаменту  
інтелектуальної власності

М.В. Паладій



(11) 48230

(19) UA

(51) МПК (2009)  
A23L 3/00

(21) Номер заявки: u 2009 09646

(22) Дата подання заявки: 21.09.2009

(24) Дата, з якої є чинними  
права на корисну модель: 10.03.2010(46) Дата публікації відомостей  
про видачу патенту та  
номер бюлетеня: 10.03.2010,  
Бюл. № 5

(72) Винахідники:

Черевко Олександр

Іванович, UA,

Погожих Микола Іванович,

UA,

Жеребкін Максим

Васильович, UA,

Гак Андрій Олександрович, UA,

Цуркан Микола Михайлович,

UA

(73) Власник:

ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ

УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧУВАННЯ

ТА ТОРГІВЛІ,

вул. Клочківська, 333, м.

Харків, 61051, UA

(54) Назва корисної моделі:

УСТАНОВКА ДЛЯ ГІДРОТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ТА СУШІННЯ КРУПИ

(57) Формула корисної моделі:

Установка для гідротермічної обробки та сушіння крупи, що складається з камери, пристрою для подачі та вивантаження продукту і підводу в камеру нагрітого повітря, яка відрізняється тим, що гідротермічна обробка та сушіння сировини проводиться у функціональній ємності із паронепроникного матеріалу за принципами сушіння змішаного теплопідводу.

(11) 48230

Пронумеровано, прошито металевими  
люверсами та скріплено печаткою  
2 арк.  
10.03.2010

 Уповноважена особа



(підпис)



УКРАЇНА

 (19) UA (11) 48230 (13) U  
 (51) МПК (2009)  
 A23L 3/00

 МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
 І НАУКИ УКРАЇНИ

 ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
 ВЛАСНОСТІ

**ОПИС**  
**ДО ПАТЕНТУ**  
**НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

 видається під  
 відповідальність  
 власника  
 патенту

(54) УСТАНОВКА ДЛЯ ГІДРОТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ТА СУШІННЯ КРУПИ

1

(21) u200909546  
 (22) 21.09.2009  
 (24) 10.03.2010  
 (46) 10.03.2010, Бюл. № 5, 2010 р.  
 (72) ЧЕРЕВКО ОЛЕКСАНДР ІВАНОВИЧ, ПОГО-  
 ЖИХ МИКОЛА ІВАНОВИЧ, ЖЕРЕБКІН МАКСИМ  
 ВАСИЛЬОВИЧ, ПАК АНДРІЙ ОЛЕГОВИЧ, ЦУРКАН  
 МИКОЛА МИХАЙЛОВИЧ  
 (73) ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
 ХАРЧУВАННЯ ТА ТОРГІВЛІ

2

(57) Установа для гідротермічної обробки та су-  
 шіння крупи, що складається з камери, пристрою  
 для подачі та вивантаження продукту і підводу в  
 камеру нагрітого повітря, яка відрізняється тим,  
 що гідротермічна обробка та сушіння сировини  
 проводиться у функціональній ємності із пароне-  
 пронижного матеріалу за принципами сушіння змі-  
 шаного теплопідводу.

Корисна модель відноситься до харчової про-  
 мисловості, зокрема до виробництва харчових  
 добавок, і може бути використана в переробній  
 галузі сільськогосподарської продукції, харчоко-  
 нцентратній та харчовій галузях промисловості.

Відомі установки для гідротермічної обробки  
 та сушіння крупи, що включають окреме відділен-  
 ня для гідротермічної обробки і плющення крупи  
 та стрічкову або шафову сушарку [1].

Недоліком цих пристроїв є необхідність забез-  
 печення високих температур під час гідротермічної  
 обробки крупи та низька ефективність сушильного  
 обладнання.

Найбільш близьким технічним рішенням до  
 корисної моделі є установка для термообробки  
 харчових продуктів, що включає камеру, транспор-  
 тер, пристрій для подачі та вивантаження продук-  
 ту і підводу в камеру нагрітого повітря. Камера  
 розділена на секції, в кожній з яких астановлено  
 транспортер. Пристрої для підводу нагрітого пові-  
 тря знаходяться в кожній секції камери [2].

Недоліком даної установки є велика питома  
 металоемність та складність обладнання, прямий  
 контакт сировини з сушильним агентом і необхід-  
 ність плющення крупи для підвищення ефективнос-  
 ті процесу сушіння та, як наслідок, ускладнення  
 технологічної схеми термообробки крупи.

В основу корисної моделі поставлена задача  
 створення установки з метою спрощення техноло-  
 гічної схеми термообробки крупи, підвищення ене-  
 ргоефективності та якості отримуваної продукції  
 шляхом використання для зневоднення сушіння  
 змішаним теплопідводом [3].

Поставлена задача досягається тим, що у ві-  
 домій установці для гідротермічної обробки та су-

шіння крупи, що складається з камери, пристрою  
 для подачі та вивантаження продукту і підводу в  
 камеру нагрітого повітря, згідно корисної моделі,  
 гідротермічна обробка та сушіння сировини про-  
 водиться у функціональній ємності із пароне-  
 пронижного матеріалу за принципами сушіння змі-  
 шаного теплопідводу.

Відміна даної установки полягає у тому, що гі-  
 дротермічна обробка сировини проводиться у фун-  
 кціональній ємності, виконаній із паронепрониж-  
 ного матеріалу з високою теплопровідністю та  
 розділеній на дві частини, одна з яких, призначена  
 для гідротермічної обробки, не має масообмінних  
 зазорів, а в іншій, призначеній для сушіння, міс-  
 тяться масообмінні зазори, площа яких принаймні  
 на порядок менша, ніж площа теплообмінних по-  
 верхонь.

Суть корисної моделі пояснюється ілюстра-  
 тивним матеріалом (Фіг.), на якому зображена уста-  
 новка для гідротермічної обробки та сушіння кру-  
 пи, що складається з вентилятора 1, нагрівачів 2,  
 сушильної камери 3, в якій міститься функціональ-  
 на ємність з двох частин 4 та 5, завантажувально-  
 го бункера 6 та дозуючих шнеків 7, 8.

Установа для гідротермічної обробки та су-  
 шіння крупи працює наступним чином. Волога си-  
 ровина із завантажувального бункера 6 дозуючими  
 шнеками 7 та 8 протягується крізь функціональну  
 ємність, виконану із паронепронижного матеріалу,  
 з визначеною швидкістю. У першій частині 4 фун-  
 кціональної ємності проводиться гідротермічна об-  
 робка крупи до готовності, в другій 5 - сушіння.  
 Оскільки друга частина 5 функціональної ємності  
 виконана таким чином, що площа масообмінних  
 зазорів принаймні на порядок менша, ніж площа

(19) UA (11) 48230 (13) U

3 48230 4

теплообмінних поверхонь, то зневоднення сировини проводиться згідно умов для сушіння змішаним теплопідводом [3]. Продукція, отримана сушінням змішаним теплопідводом, характеризується високою якістю, а процес високою - енергоефективністю.

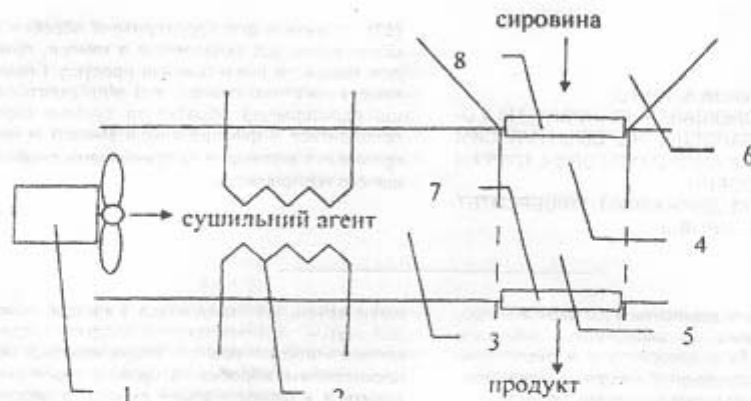
Таким чином, запропонований пристрій дає можливість зменшити контакт сушильного агенту з сировиною, уникнути плісощення сировини, підвищити енергоефективність процесу зневоднення та якість отримуваної продукції.

Література

1. Гришин М.А., Атаназевич В.И., Семенов Ю.Г. Установки для сушки пищевых продуктов: Справочник. - М: Агропромиздат, 1989. - 215с.

2. Пат. № 1785644 А1 SU, МКИ<sup>6</sup> А23L3/54, F26B17/04. Устройство для термообработки пищевых продуктов /В.Е. Бабенко, Ю.М. Плаксин, Н.Х. Беридзе, М.Е. Чернов, Г.А. Дахамидзе. - № 4897449/13; Заявл. 28.12.1990; Опубл. 07.01.1993, Бюл. №1.

3. Пат. 2096962 РФ, МКИ<sup>6</sup> А23В7/03. Способ сушки пищевых продуктов /Н.И. Погожих, В.А. Потапов, Н.М. Цуркан (Украина). - № 94033280/13; Заявл. 13.09.94; Опубл. 27.11.97. Бюл. №33. - 4с.



Фіг.

Комп'ютерна верстка Л.Литвиненко

Підписне

Тираж 26 прим.

Міністерство освіти і науки України

Державний департамент інтелектуальної власності, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ - 42, 01601



## **ДОДАТОК Б**

### **Приклади розрахунку за допомогою пакету програм MathCad**

- Б.1. Приклади програм для розрахунку деяких функцій для математичної моделі розвитку дисипативних структур під час ІнТМО**
- Б.2. Розрахунок основних технічних характеристик установки малої продуктивності для гідротермічної обробки круп з використанням ІнТМО**
- Б.3. Програми для колориметричних розрахунків**

## Додаток Б.1

Определение кинетики температуры как функции температуры сушильного агента

$$F(x, y, P, z) := \left\{ \begin{array}{l} \text{for } n \in 0..P \\ \quad \rightarrow \\ \quad X^{(n)} \leftarrow x^n \\ a \leftarrow (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot y \\ f \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0..P \\ \quad f \leftarrow f + a_1 \cdot z^i \\ f \end{array} \right.$$

$$ap(x, y, P) := \left\{ \begin{array}{l} \text{for } n \in 0..P \\ \quad \rightarrow \\ \quad X^{(n)} \leftarrow x^n \\ a \leftarrow (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot y \end{array} \right.$$

data0 := READPRN("temp\_vs\_tau\_40.txt")

data1 := READPRN("temp\_vs\_tau\_70.txt")

t0 := data0<0>      T0 := data0<1>

t1 := data1<0>      T1 := data1<1>

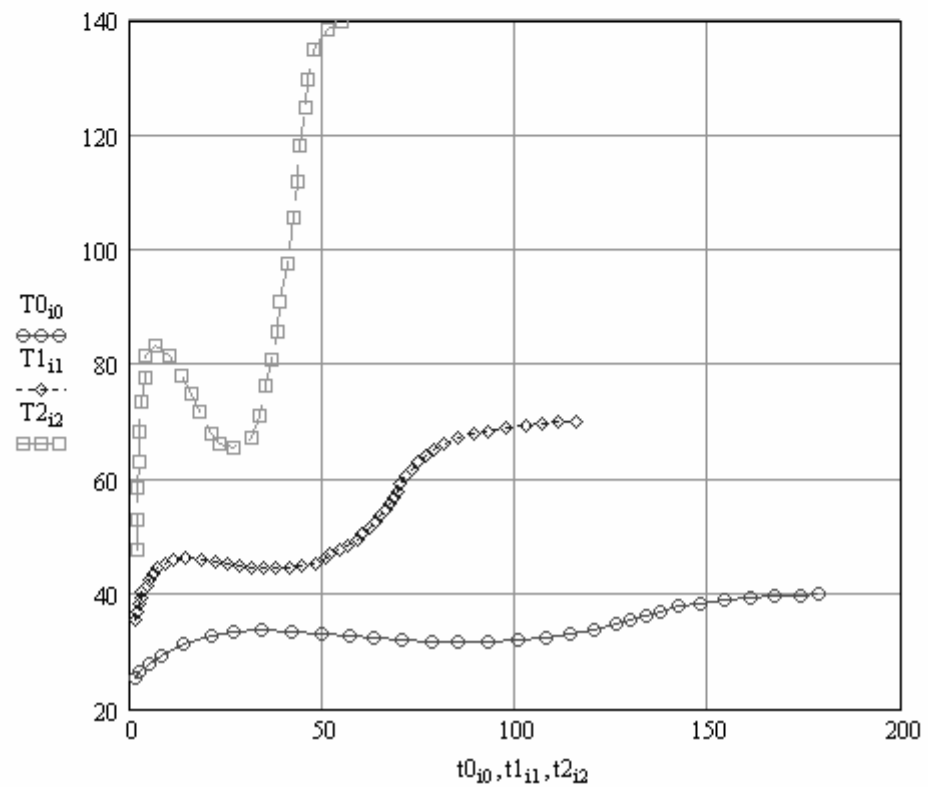
i0 := 0..last(t0)

i1 := 0..last(t1)

data2 := READPRN("temp\_vs\_tau\_140.txt")

t2 := data2<0>      T2 := data2<1>

i2 := 0..last(t2)



Функция, описывающая продолжительность процесса сушки от температуры сушильного агента

$$\tau_{t0} := \max(t0) \quad \tau_{t1} := \max(t1) - 10 \quad \tau_{t2} := \max(t2) - 20$$

temp :=

	0
0	40
1	70
2	140

$$k := 0..last(temp)$$

$$a := intercept(temp, \ln(\tau))$$

$$b := slope(temp, \ln(\tau))$$

## TAU VS TEMP

$$a = 5.823 \quad b = -0.016$$

$$at0 := e^{intercept(temp, \ln(\tau))}$$

$$at1 := slope(temp, \ln(\tau))$$

$$at0 = 337.857$$

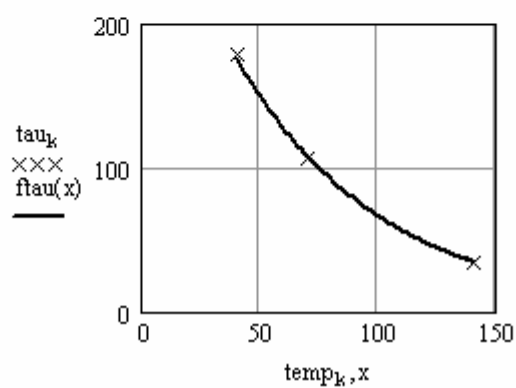
$$at1 = -0.016$$

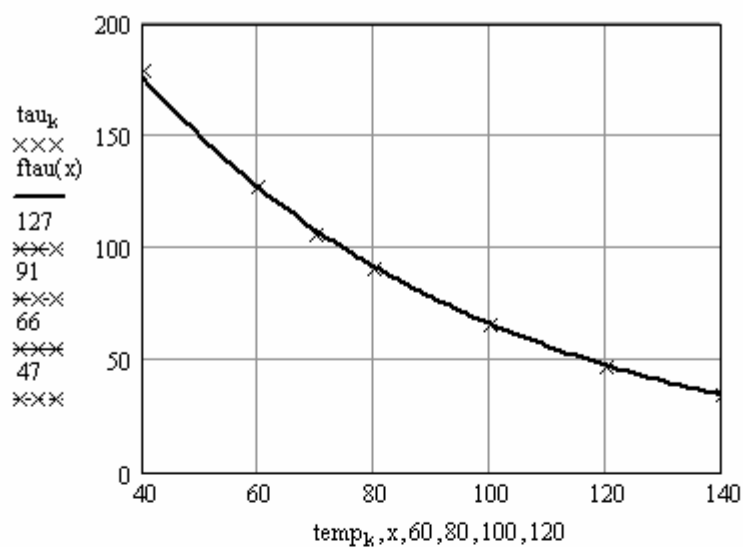
$$f_{\tau}(\theta_{sa}) := 337.857 \cdot e^{-0.016 \cdot \theta_{sa}}$$

$$corr(\tau, f_{\tau}(temp)) = 0.999$$

$$f_{\tau}(x) := at0 \cdot e^{at1 \cdot x}$$

$$x := 40..140$$





$$ftau(30) = 207.168 \quad ftau(100) = 66.175$$

$$ftau(40) = 176.002 \quad ftau(120) = 47.763$$

$$ftau(60) = 127.031 \quad ftau(140) = 34.473$$

$$ftau(70) = 107.921$$

Функция, описывающая кинетику температуры

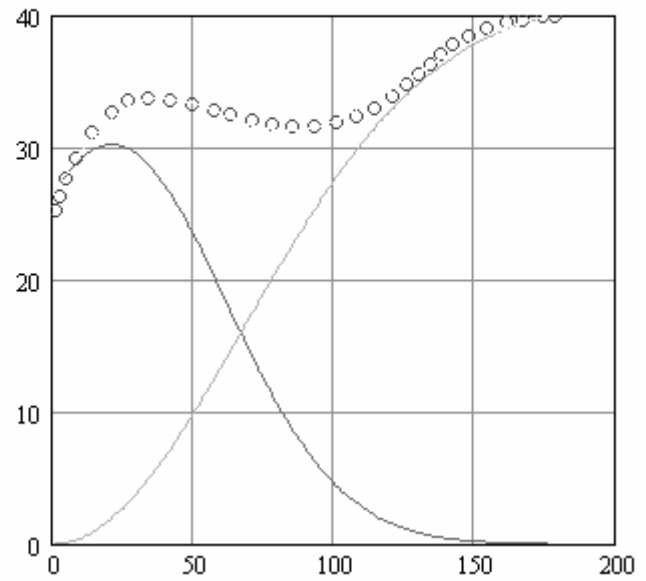
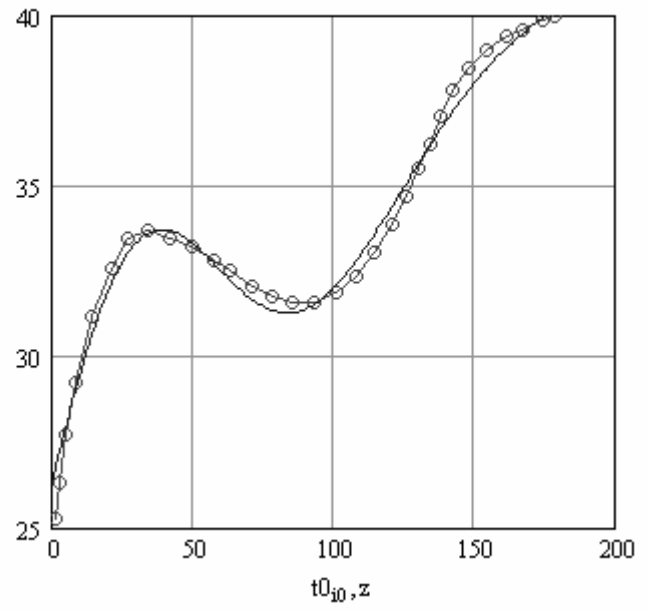
$$fsum(z, a0, a1, a2, a3) := \left[ 1 - e^{-z^2 \cdot a3} + a0 \cdot e^{-\frac{(z-a1)^2}{a2}} \right]$$

$$a0 := 0.73 \quad a1 := 21 \quad a2 := 3300 \quad a3 := 1.09 \cdot 10^{-4} \quad a4 := \max(T0) \quad a5 := ftau(\max(T0))$$

$$A0_0 := a0 \quad A0_1 := a1 \quad A0_2 := a2 \quad A0_3 := a3 \quad A0_4 := a4 \quad A0_5 := a5$$

z := 0..a5

$T0_{i0}$   
 $\circ \circ \circ$   
 $\frac{fsum(z, a0, a1, a2, a3)}{fsum(a5, a0, a1, a2, a3)} \cdot a4$   
 —



+++++

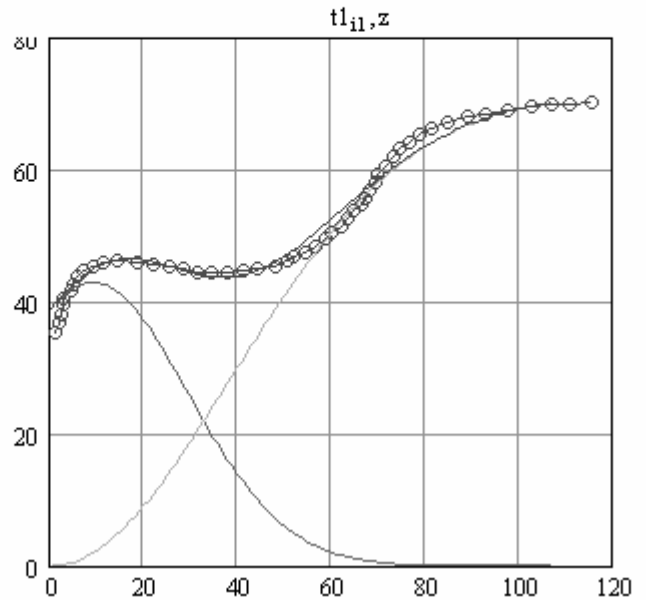
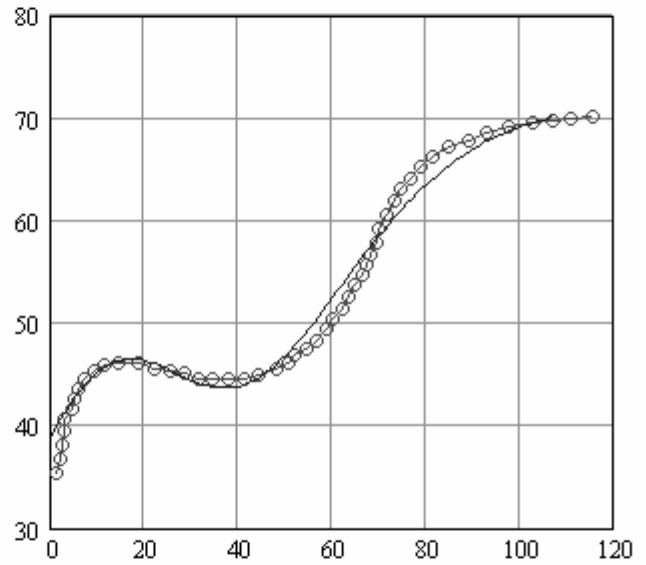
$$fsum(z, a0, a1, a2, a3) := \left[ 1 - e^{-z^2 \cdot a3} + a0 \cdot e^{-\frac{(z-a1)^2}{a2}} \right]$$

a0 := 0.6    a1 := 9    a2 := 850    a3 := 3.4 · 10<sup>-4</sup>    a4 := max(T1)    a5 := flau(max(T1))

A1<sub>0</sub> := a0    A1<sub>1</sub> := a1    A1<sub>2</sub> := a2    A1<sub>3</sub> := a3    A1<sub>4</sub> := a4    A1<sub>5</sub> := a5

z := 0.. a5

T1<sub>il</sub>  
 ○○○  
 $\frac{fsum(z, a0, a1, a2, a3)}{fsum(a5, a0, a1, a2, a3)} \cdot a4$



+++++

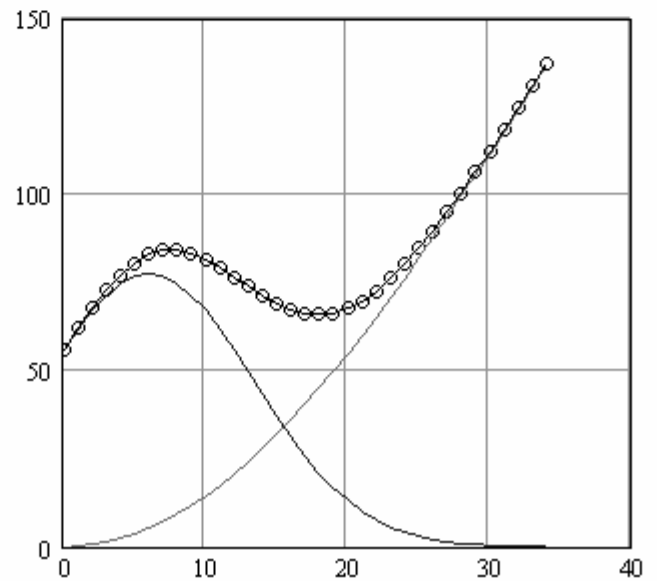
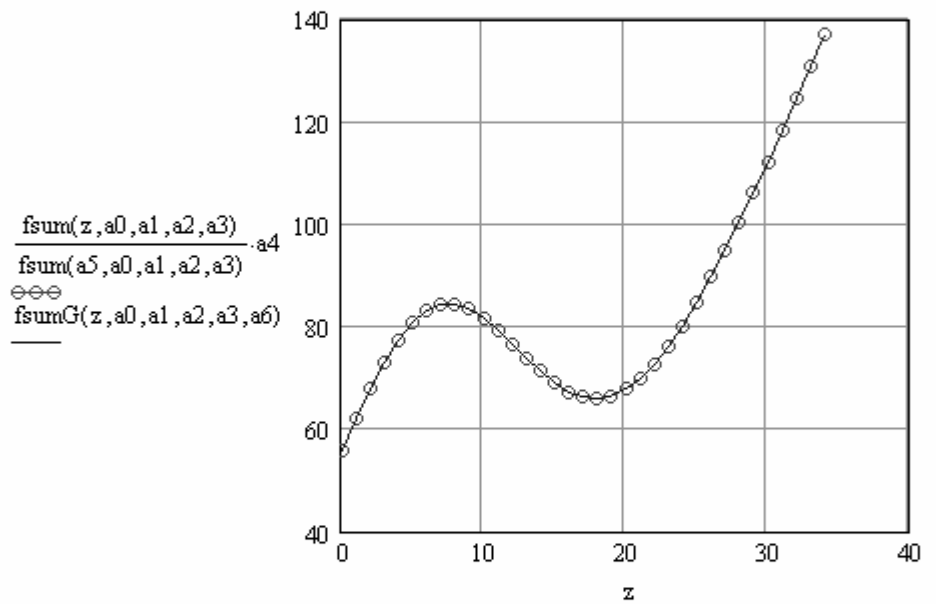
$$fsum(z, a0, a1, a2, a3) := \left[ 1 - e^{-z^2 \cdot a3} + a0 \cdot e^{-\frac{(z-a1)^2}{a2}} \right]$$

$$a0 := 0.21 \quad a1 := 6 \quad a2 := 110 \quad a3 := 4 \cdot 10^{-4} \quad a4 := \max(T2) \quad a5 := \text{flau}(\max(T2))$$

$$A2_0 := a0 \quad A2_1 := a1 \quad A2_2 := a2 \quad A2_3 := a3 \quad A2_4 := a4 \quad A2_5 := a5$$

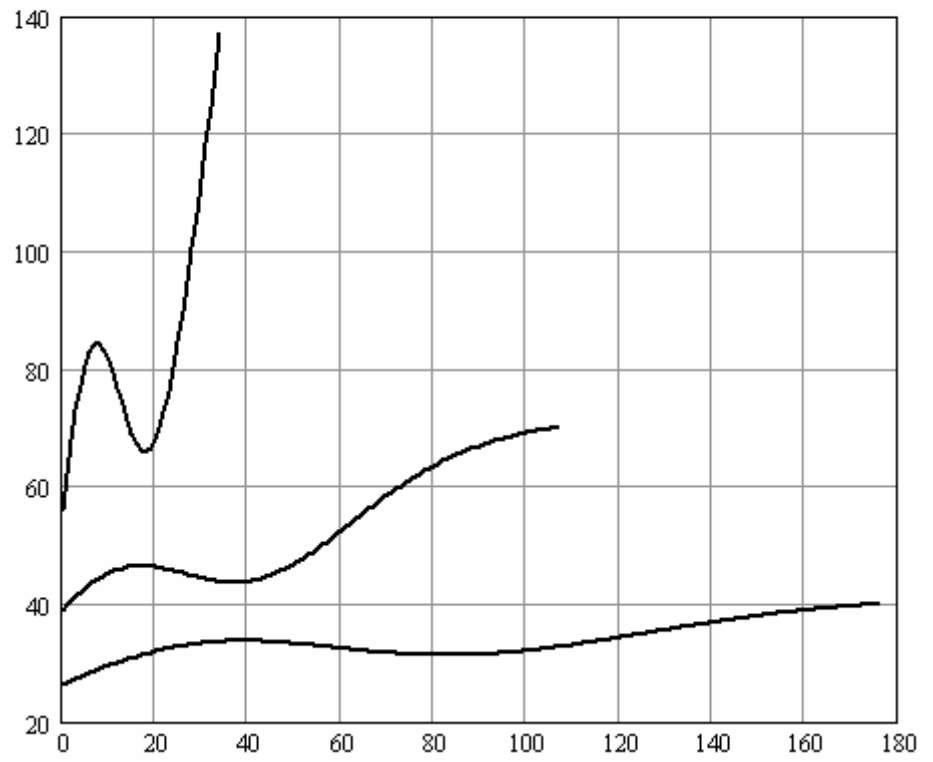
$$a6 := \frac{1}{fsum(a5, a0, a1, a2, a3)} \cdot a4 \quad A2_6 := a6$$

$$fsumG(z, a0, a1, a2, a3, a6) := a6 \cdot fsum(z, a0, a1, a2, a3) \quad z := 0..a5$$



```
z1 := 0..ftau(40)  z3 := 0..ftau(140)
```

```
z2 := 0..ftau(70)
```





Расчет коэффициентов

$$A^{(0)} := A0 \quad A^{(1)} := A1 \quad A^{(2)} := A2 \quad A := A^T$$

$$A = \begin{pmatrix} 0.73 & 21 & 3.3 \times 10^3 & 1.09 \times 10^{-4} & 40 & 176.002 & 41.394 \\ 0.6 & 9 & 850 & 3.4 \times 10^{-4} & 70.132 & 107.689 & 71.519 \\ 0.21 & 6 & 110 & 4 \times 10^{-4} & 140 & 34.473 & 369.91 \end{pmatrix}$$

$$C0 := A^{(0)} \quad C1 := A^{(1)} \quad C2 := A^{(2)} \quad C3 := A^{(3)} \quad C4 := A^{(4)} \quad C6 := A^{(6)}$$

$$i := 0..last(C0)$$

coef0

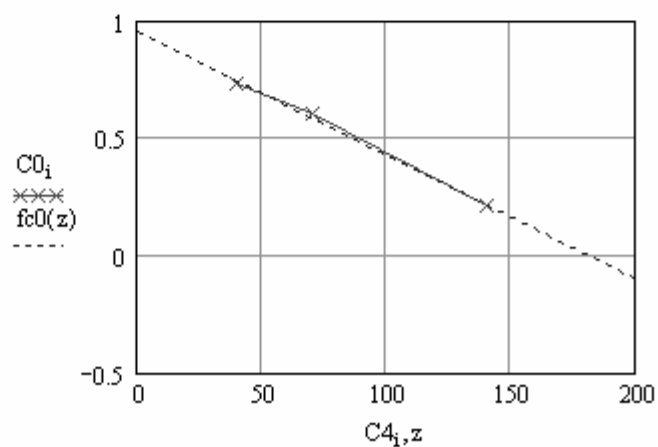
$$c00 := intercept(C4, C0) \quad c01 := slope(C4, C0)$$

$$c00 = 0.952 \quad c01 = -5.267 \times 10^{-3}$$

$$fc0(z) := c00 + c01 \cdot z$$

$$z := 0..200$$

$$C0 = \begin{pmatrix} 0.73 \\ 0.6 \\ 0.21 \end{pmatrix}$$



$$coef0(\theta_{sa}) := 0.952 - 5.267 \times 10^{-3} \cdot \theta_{sa}$$

## coef1

$$c10 := e^{\text{intercept}(C4, \ln(C1))}$$

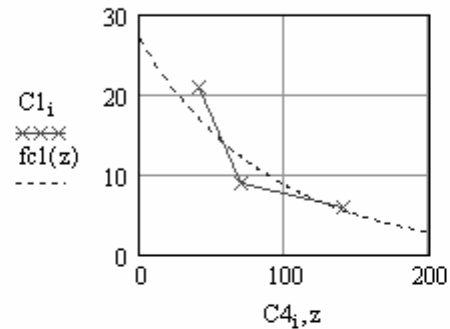
$$c11 := \text{slope}(C4, \ln(C1))$$

$$c10 = 26.855$$

$$c11 = -0.011$$

$$f1(x) := c10 \cdot e^{c11 \cdot x}$$

$$C1 = \begin{pmatrix} 21 \\ 9 \\ 6 \end{pmatrix}$$



$$\text{coef1}(\theta_{sa}) := 26.855 \cdot e^{-0.011 \cdot \theta_{sa}}$$

## coef2

$$c20 := e^{\text{intercept}(C4, \ln(C2))}$$

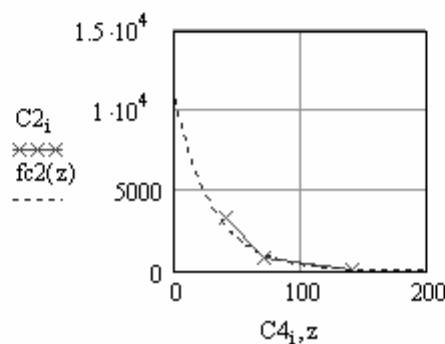
$$c21 := \text{slope}(C4, \ln(C2))$$

$$f2(x) := c20 \cdot e^{c21 \cdot x}$$

$$c20 = 1.074 \times 10^4$$

$$c21 = -0.033$$

$$C2 = \begin{pmatrix} 3.3 \times 10^3 \\ 850 \\ 110 \end{pmatrix}$$



$$\text{coef2}(\theta_{sa}) := 1.074 \times 10^4 \cdot e^{-0.033 \cdot \theta_{sa}}$$

## coef3

$$C3 = \begin{pmatrix} 1.09 \times 10^{-4} \\ 3.4 \times 10^{-4} \\ 4 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

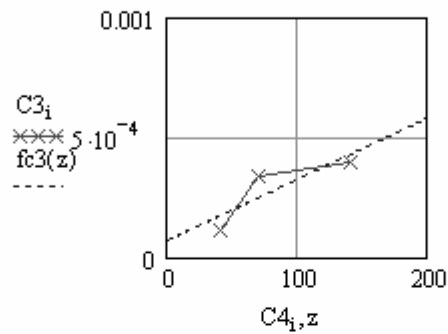
$$c30 := \text{intercept}(C4, C3)$$

$$c31 := \text{slope}(C4, C3)$$

$$fc3(z) := c30 + c31 \cdot z$$

$$c30 = 7.044 \times 10^{-5}$$

$$c31 = 2.549 \times 10^{-6}$$



$$\text{coef3}(\theta_{sa}) := 7.044 \times 10^{-5} + 2.549 \times 10^{-6} \cdot \theta_{sa}$$

## coef4

$$C6 = \begin{pmatrix} 41.394 \\ 71.519 \\ 369.91 \end{pmatrix}$$

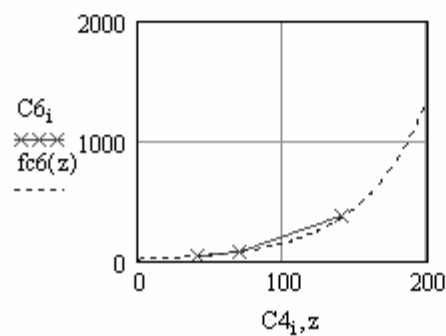
$$c60 := e^{\text{intercept}(C4, \ln(C6))}$$

$$c61 := \text{slope}(C4, \ln(C6))$$

$$fc6(x) := c60 \cdot e^{c61 \cdot x}$$

$$c60 = 16.21$$

$$c61 = 0.022$$



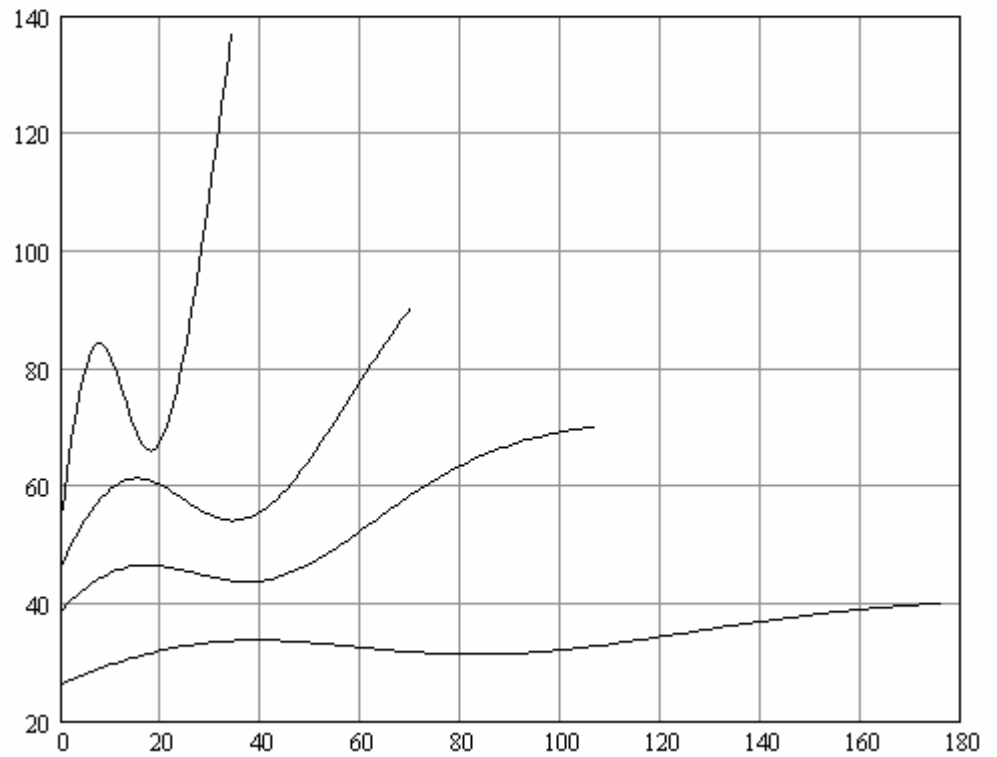
$$\text{coef4}(\theta_{sa}) := 16.21 \cdot e^{0.022 \cdot \theta_{sa}}$$

$$FSUM(\tau, \theta_{sa}) := \text{coef4}(\theta_{sa}) \cdot \left[ \text{coef0}(\theta_{sa}) \cdot e^{\frac{-(\tau - \text{coef1}(\theta_{sa}))^2}{\text{coef2}(\theta_{sa})}} + 1 - e^{-\tau^2 \cdot \text{coef3}(\theta_{sa})} \right]$$

z := 0..70

z1 := 0..ftau(40)    z3 := 0..ftau(140)

z2 := 0..ftau(70)



## Расчет СТП-сушилки для крупы

Нагрузка на ФЕ	$G := 4$		
Количество ФЕ	$N := 4$		
Характеристики продукта	$W0 := 180$	$Wk := 10$	$Cc := 1.424$
Режим сушки	$t := 100$	$\phi := 20$	
	$dt := 8.5$	$t0 := 20$	$d0 := 12$
Продолжительность	нагрева	сушки	
	$th1 := 10$	$th2 := 60$	

Размеры камеры	
стенка 1	$F := \begin{pmatrix} 1.6 \cdot 2.2 \cdot 2.2 \\ 1.2 \cdot 2.2 \cdot 2.2 \\ 1.2 \cdot 1.6 \\ 1.2 \cdot 1.6 \end{pmatrix}$
стенка 2	
крышка	
дно	

Живое сечение для воздуха	$Fa := 1.7 \cdot 0.03 \cdot 0.5$
---------------------------	----------------------------------

Масса установки	$mi := 450$
-----------------	-------------

Характеристики теплоизоляции		
стенка 1	$\text{lamb} := \begin{pmatrix} 45 & 0.035 \\ 45 & 0.035 \\ 45 & 0.035 \\ 45 & 0.035 \end{pmatrix}$	$\text{delt} := \begin{pmatrix} 3 & 50 \\ 3 & 50 \\ 3 & 50 \\ 3 & 50 \end{pmatrix}$
стенка 2		
крышка		
дно		

$$w(W) := \frac{W}{100 + W} \quad m0 := N \cdot G \quad mc := m0 \cdot (1 - w(W0)) \quad mk := \frac{mc}{1 - w(Wk)}$$

$$mw := m0 - mk \quad M := \frac{mw}{th2} \cdot 60$$

$$mk = 6.286 \quad m0 = 16 \quad mw = 9.714 \quad M = 9.714$$

$$a := \begin{pmatrix} 16.293 \\ -3732.4 \\ -232020 \end{pmatrix} \quad m := 0..2 \quad B := 99.325 \quad h(t) := \exp \left[ \sum_m \frac{a_m}{(273 + t)^m} \right]$$

$$d(t, \text{phi}) := 6.22 \cdot \text{phi} \cdot \frac{h(t)}{B - \text{phi} \cdot 0.01 \cdot h(t)} \quad x := t$$

$$I(t, d) := t + \frac{d}{1000} \cdot (2500 + 1.875 \cdot t) \quad d1 := d(t, \text{phi}) \quad \text{Pr} := \begin{pmatrix} \frac{m0}{th2} \cdot 60 \\ \frac{mk}{th2} \cdot 60 \\ M \end{pmatrix}$$

$$I1 := I(t, d1)$$

$$tm := \text{root}(I(x, d(x, 100)) - I1, x)$$

$$d1 = 159.548 \quad tm = -1.253 \times 10^4$$

$$Va(t, d) := \left[ 0.461 \cdot (273 + t) \cdot \frac{622 + d}{B \cdot 1000} \right]$$

$$Qh := (mc \cdot Cc + mw \cdot 4.19) \cdot (tm - t0) + mi \cdot 0.46 \cdot \frac{t - t0}{2}$$

$$qh := \frac{Qh}{m0 - mk} \quad Ph := \frac{Qh}{th1 \cdot 60} \quad Ph = -1.008 \times 10^3$$

$$k(j) := \left( \frac{1}{10} + \frac{1}{23} + \text{delt}_{1,0} \cdot \frac{0.001}{\text{lamb}_{i,0}} + \text{delt}_{1,1} \cdot \frac{0.001}{\text{lamb}_{i,1}} \right)^{-1} \quad j := 0..3$$

$$P_j := k(j) \cdot F_j \cdot (t - t0) \quad t2 := t - dt$$

$$P5 := \sum P \cdot 0.001 \cdot 1.5 \quad q5 := \frac{P5}{M} \cdot 3600$$

$$P5 = 1.328 \quad q5 = 491.969$$

$$x := d1$$

$$d2 := \text{root}\left[\left[I1 - I(t2, x) - q5 \cdot 10^{-3} \cdot (x - d1)\right], x\right] \quad d2 = 163.039$$

$$\text{eps} := \frac{d2 - d1}{d2 - d0} \quad I01 := I(t0, d0) \cdot \text{eps} + I(t2, d2) \cdot (1 - \text{eps}) \quad L1 := \frac{1}{d2 - d1}$$

$$t01 := \text{root}(I(x, d1) - I01, x) \quad t01 = 90.199$$

$$V := \begin{pmatrix} Va(t0, d0) \\ Va(th2, d1) \\ Va(t2, d2) \end{pmatrix} \quad L := \begin{pmatrix} V_0 \cdot L1 \cdot \text{eps} \\ V_1 \cdot L1 \\ V_2 \cdot L1 \cdot \text{eps} \end{pmatrix} \cdot M \cdot 1000 \quad L = \begin{pmatrix} 55.453 \\ 3.362 \times 10^3 \\ 85.419 \end{pmatrix}$$

$$qi := \frac{I(t2, d2) - I01}{d2 - d1} \cdot 1000 - tm \cdot 4.19 \quad v := \frac{L1}{3600 \cdot Fa}$$

$$qc := 1.1 \cdot (qh + qi + q5) \quad Pk := (qi + q5) \cdot M \cdot \frac{1.1}{3600} \quad \text{Exp} := \begin{pmatrix} \frac{mw}{m0} \\ \frac{mw}{mk} \\ 1 \end{pmatrix} \cdot \frac{qc}{3600}$$

$$h := 60 \quad \text{min} := 1$$

$$\text{ksi\_rash}(f, F) := \left(\frac{f}{F} - 1\right)^2 \quad \text{ksi\_suzh}(f, F) := 0.5 \cdot \left(1 - \frac{f}{F}\right)$$

$$\text{ksi\_dia}(f, F) := \left(1 + \frac{0.707}{\sqrt{1 - \frac{f}{F}}}\right)^2 \cdot \left(\frac{f}{F} - 1\right)^2 \quad \text{ksi\_pov90} := 1.1 \quad \text{ksi\_pov135} := 0.35$$

$$\text{ksi\_konf}(F, f, \text{alf}) := \sin(\text{alf}) \cdot \left(1 - \frac{f}{F}\right)^2 + \frac{0.02}{8 \cdot \sin(\text{alf})} \cdot \left[1 - \left(\frac{f}{F}\right)^2\right] \quad \text{fd} := 1.02$$

$$\text{akam} := [(24 + 30) \cdot N + 24] \cdot 0.01 \quad \text{hkam} := 0.51 \quad \text{hpod} := 0.026 \quad \text{ab} := 0.35$$

$$\text{bkam} := 0.5 \quad \text{akam} := 0.348 \quad \text{delth} := 0.024 - 0.01 \quad \text{Db} := 0.5$$

$$F := \begin{bmatrix} \text{bkam} \cdot \text{akam} \\ \pi \cdot \text{Db}^2 \cdot 0.25 \\ \text{ab} \cdot 0.5 \\ \text{ab} \cdot \text{akam} \\ \text{ab} \cdot \text{akam} \\ 0.5 \cdot \text{akam} \\ \text{bkam} \cdot \text{akam} \\ (\text{akam} - N \cdot \text{hpod}) \cdot \text{bkam} \\ \text{delth} \cdot \text{bkam} \cdot (N + 1) \\ (\text{akam} - N \cdot \text{hpod}) \cdot \text{bkam} \end{bmatrix} \quad \text{ksi} := \begin{pmatrix} \text{ksi\_pov90} \\ \text{ksi\_suzh}(F_1, F_0) \\ \text{ksi\_pov135} \\ \text{ksi\_rash}(F_3, F_4) \\ \text{ksi\_pov90} \\ \text{ksi\_pov90} \\ \text{ksi\_dia}(F_6, \text{fd}) \\ \text{ksi\_suzh}(F_7, F_6) \\ \text{ksi\_rash}(F_8, F_7) \cdot 3 \\ \text{ksi\_rash}(F_9, F_6) \end{pmatrix}$$

$$\text{ro}(t, d) := 2.17 \cdot \frac{101}{t + 273} \cdot \frac{1000 + d}{622 + d}$$

$$n := \text{rows}(F) - 1$$

$$i := 0..n$$

$$v_i := \frac{L_1}{3600 \cdot F_i}$$

$$\text{vinp} := v_0$$

$$\text{vout} := v_0$$

$$P = \begin{pmatrix} 394.068 \\ 295.551 \\ 97.703 \\ 97.703 \end{pmatrix}$$

$$p := \frac{\text{ro}(t, d)}{2} \cdot \overrightarrow{[v^2 \cdot (1 + \text{ksi})]}$$

$$P := \sum p$$

$$F_{\text{inp}} := \frac{L_0}{3600 \cdot \text{vinp}}$$

$$F_{\text{out}} := \frac{L_2}{3600 \cdot \text{vout}}$$

$$F_{\text{inp}} = 2.87 \times 10^{-3} \quad F_{\text{out}} = 4.421 \times 10^{-3}$$

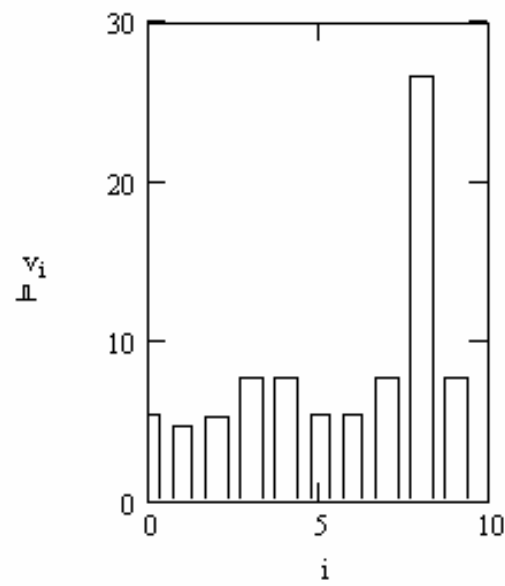


$$\frac{L_1}{3600 \cdot fd} = 4.669$$

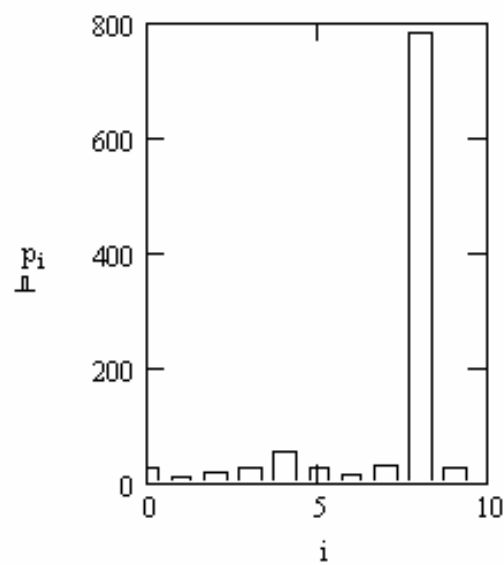
$$Pv := L_1 \cdot P \cdot \frac{1.1}{3600000 \cdot 0.7 \cdot 0.97}$$

$$Pv = 1.534$$

$$sm := 0.01$$



	0
0	5.367
1	4.756
2	5.336
3	7.666
4	7.666
5	5.367
6	5.367
7	7.654
8	26.679
9	7.654



	0
0	26.362
1	9.225
2	16.754
3	25.619
4	53.801
5	26.362
6	15.011
7	29.351
8	783.594
9	27.816

## Характеристики установки

	циркуляция	приток	выхлоп
Расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч	$L_1 = 3.428 \times 10^3$	$L_0 = 252.542$	$L_2 = 303.216$
	$d1 = 41.643$	$d0 = 12$	$d2 = 44.775$
	сушка	нагрев	потери
Мощность калорифера, кВт	$P_k = 11.875$	$P_h = 10.926$	$P_5 = 0.83$
	сырье	сушь	вода
Производительность, кг/ч	$Pr_0 = 16$	$Pr_1 = 6.0$	$Pr_2 = 5.8$
Расход энергии, кВт ч/кг	$Exp_0 = 8.1$	$Exp_1 = 3.9$	$Exp_2 = 0.83$
Масса продукта	$m_0 = 18$	$m_k = 3.6$	$m_w = 14.4$
Режим сушки	$W_0 = 450$	$W_k = 10$	$m_c = 3.273$
	$t = 70$ $t_{01} = 57.739$	$t_m = 41.237$	min v $v_7 = 9.919$
	$t_0 = 20$ $dt = 8.5$	$\phi = 20$	max v $v_8 = 19.432$
Продолжительность: нагрев/сушка, мин	$th1 = 10$	$th2 = 60$	$N = 4$
Характеристики вентилятора:	$L_1 = 3.428 \times 10^3$	$P = 652.284$	$P_v = 1.006$
Площадь прит.-вытяж. каналов	$F_{inp} = 0.013$	$F_{out} = 0.015$	

data\_exp :=

	0	1	2	3	4
0	400	0.2	0.0841	$2.1 \cdot 10^{-3}$	0.3992
1	450	0.2	3.9191	0.4432	20.6551
2	500	0.34	0.0511	3.4077	2.8717
3	550	0.21	4.2833	9.8343	0.086
4	600	0.17	8.9536	5.3157	$6.7 \cdot 10^{-3}$
5	650	0.3	2.3531	0.8876	0
6	700	0.5	0.0806	0.029	0

Lamb := data\_exp<sup>(0)</sup>      Po := data\_exp<sup>(1)</sup>

X\_exp := data\_exp<sup>(2)</sup>      Y\_exp := data\_exp<sup>(3)</sup>      Z\_exp := data\_exp<sup>(4)</sup>

i := 0..rows(data\_exp) - 1

X\_exp<sub>i</sub> := X\_exp · Po<sub>i</sub>

Y\_exp<sub>i</sub> := Y\_exp · Po<sub>i</sub>

Z\_exp<sub>i</sub> := Z\_exp · Po<sub>i</sub>

Sum\_X :=  $\sum$  X\_exp      Sum\_X = 3.986

Sum\_Y :=  $\sum$  Y\_exp      Sum\_Y = 4.497

Sum\_Z :=  $\sum$  Z\_exp      Sum\_Z = 5.206

coef(x) :=  $\frac{x}{\text{Sum\_X} + \text{Sum\_Y} + \text{Sum\_Z}}$

X\_result := coef(Sum\_X)      Y\_result := coef(Sum\_Y)      Z\_result := coef(Sum\_Z)

X\_result = 0.291

Y\_result = 0.329

Z\_result = 0.38

**Experimental point**

Y\_result = 0.329

X<sub>1</sub> := X\_result      Y<sub>1</sub> := Y\_result

**Base point**

X<sub>0</sub> := 0.333      Y<sub>0</sub> := 0.333

Data :=

	0	1	2
0	0.18	0.01	400
1	0.178	0.019	411.35
2	0.17	0.013	425
3	0.16	0.02	436.51
4	0.155	0.021	445
5	0.145	0.03	460
6	0.11	0.08	474.51
7	0.09	0.13	480
8	0.07	0.18	483
9	0.06	0.215	485
10	0.05	0.265	488
11	0.04	0.295	490
12	0.03	0.35	493
13	0.02	0.42	495
14	0.01	0.49	498
15	$7 \cdot 10^{-3}$	0.54	500
16	0	0.65	505
17	$3.207 \cdot 10^{-3}$	0.686	506.5
18	$5 \cdot 10^{-3}$	0.71	508
19	0.01	0.75	510
20	0.03	0.8	515
21	0.053	0.826	517
22	0.08	0.83	520
23	0.12	0.825	525
24	0.16	0.8	530
25	0.19	0.78	535
26	0.22	0.755	540
27	0.3	0.69	550
28	0.38	0.62	560
29	0.45	0.555	570
30	0.51	0.485	580
31	0.57	0.42	590
32	0.63	0.37	600
33	0.66	0.355	610
34	0.69	0.3	620
35	0.715	0.27	640
36	0.725	0.265	670
37	0.726	0.255	700

$$F(x,y,P,z) := \left\{ \begin{array}{l} \text{for } n \in 0..P \\ \quad \rightarrow \\ \quad X^{(n)} \leftarrow x^n \\ a \leftarrow (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot y \\ f \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0..P \\ \quad f \leftarrow f + a_1 \cdot z^i \\ f \end{array} \right.$$

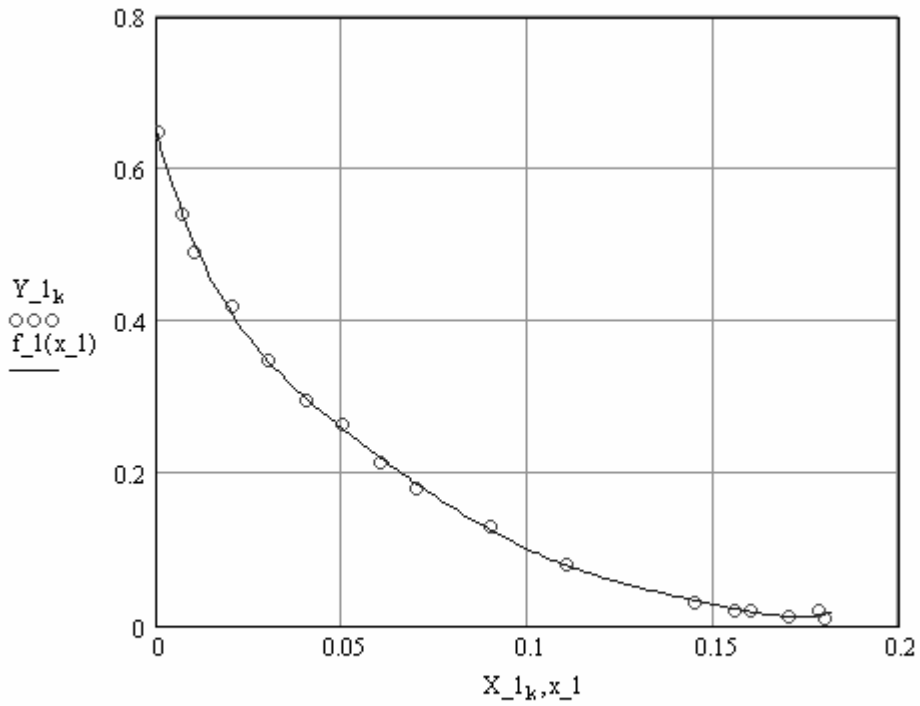
k := 0..16

 $X_{1k} := \text{Data}_{k,0}$  $Y_{1k} := \text{Data}_{k,1}$ 

i := 0..rows(Data) - 1

P\_1 := 6

 $f_1(x) := F(X_1, Y_1, P_1, x)$  $x_1 := \min(X_1), \min(X_1) + 0.001 .. \max(X_1) + 0.002$

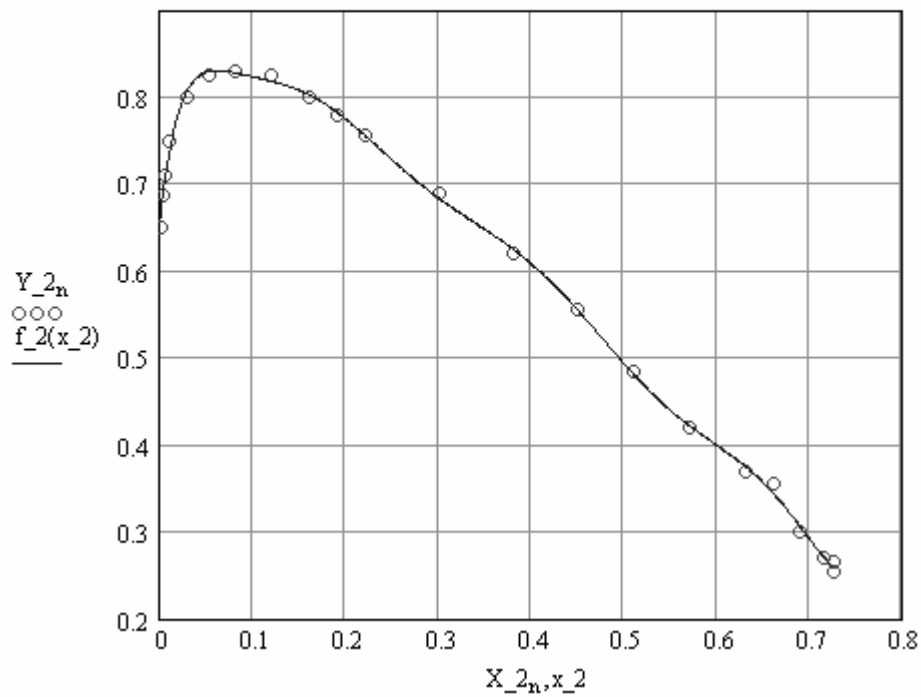


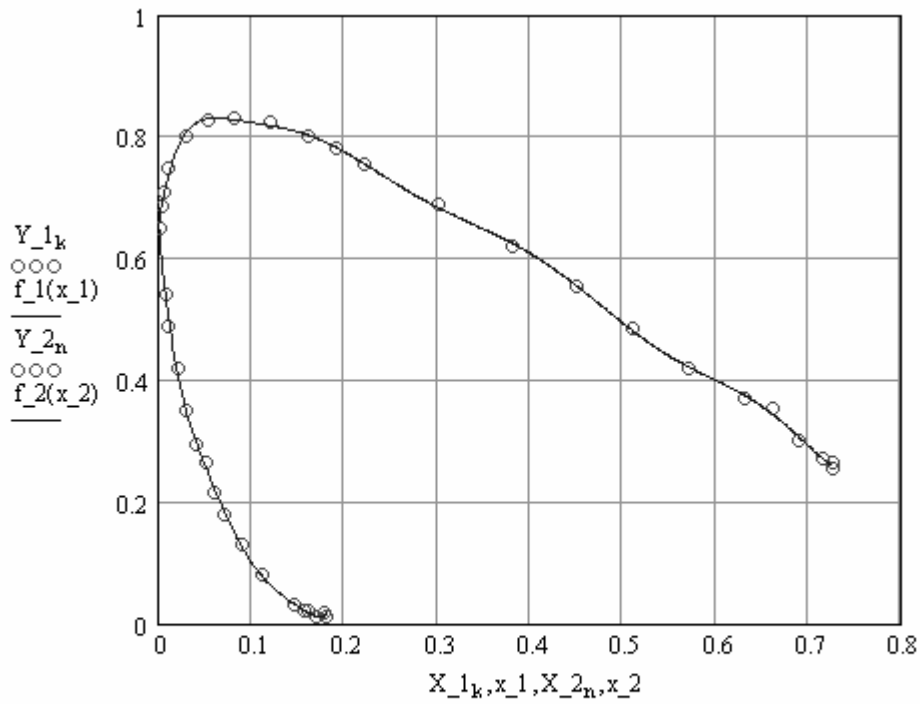
n := 0..rows(Data) - 17

X<sub>2n</sub> := Data<sub>n+16,0</sub>      Y<sub>2n</sub> := Data<sub>n+16,1</sub>

P<sub>2</sub> := 10

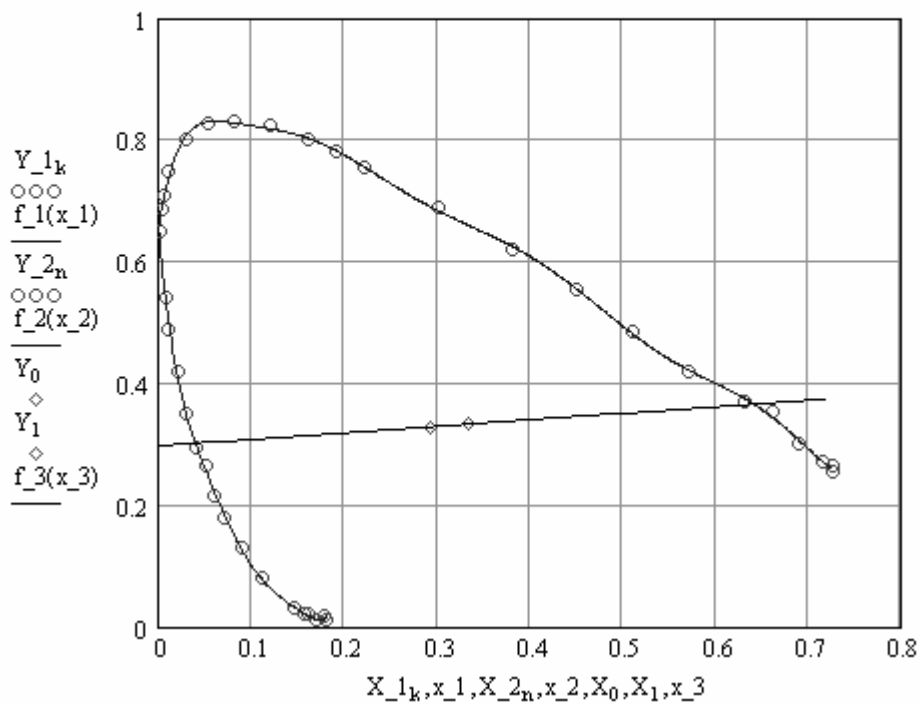
f<sub>2</sub>(x) := F(X<sub>2</sub>, Y<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>, x)      x<sub>2</sub> := min(X<sub>2</sub>), min(X<sub>2</sub>) + 0.001 .. max(X<sub>2</sub>)





```

a3 := intercept(X,Y)
b3 := slope(X,Y)
f_3(z) := a3 + b3·z      x_3 := 0,0.01..max(Data(0))
a3 = 0.297      b3 = 0.107
    
```



$$\text{numb} := \text{if}(-0.95 < b3 < 2.111 \wedge X_1 < X_0, 1, 2)$$

$$\text{numb} = 1$$

$$\text{Func}(x) := \text{if}(\text{numb} = 1, f_1(x), f_2(x))$$

$$x := 0.1 \quad y := 0.5$$

Given

$$y = \text{Func}(x)$$

$$y = f_3(x)$$

$$x > 0$$

$$R := \text{MinErr}(x, y)$$

$$\text{numb}_X := R_0$$

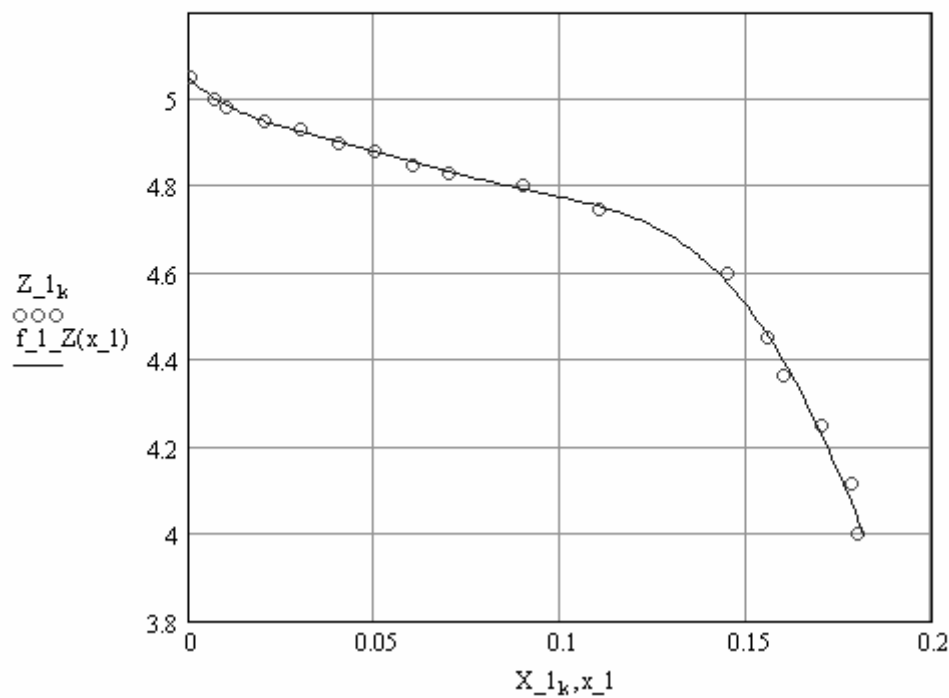
$$\text{numb}_Y := R_1$$

$$R = \begin{pmatrix} 0.039 \\ 0.302 \end{pmatrix}$$

$$k := 0..16$$

$$X_{1k} := \text{Data}_{k,0} \quad Z_{1k} := \frac{\text{Data}_{k,2}}{100} \quad i := 0.. \text{rows}(\text{Data}) - 1 \quad P_{1_Z} := 6$$

$$f_{1_Z}(x) := F(X_1, Z_1, P_{1_Z}, x) \quad x_1 := \min(X_1), \min(X_1) + 0.001.. \max(X_1) + 0.002$$

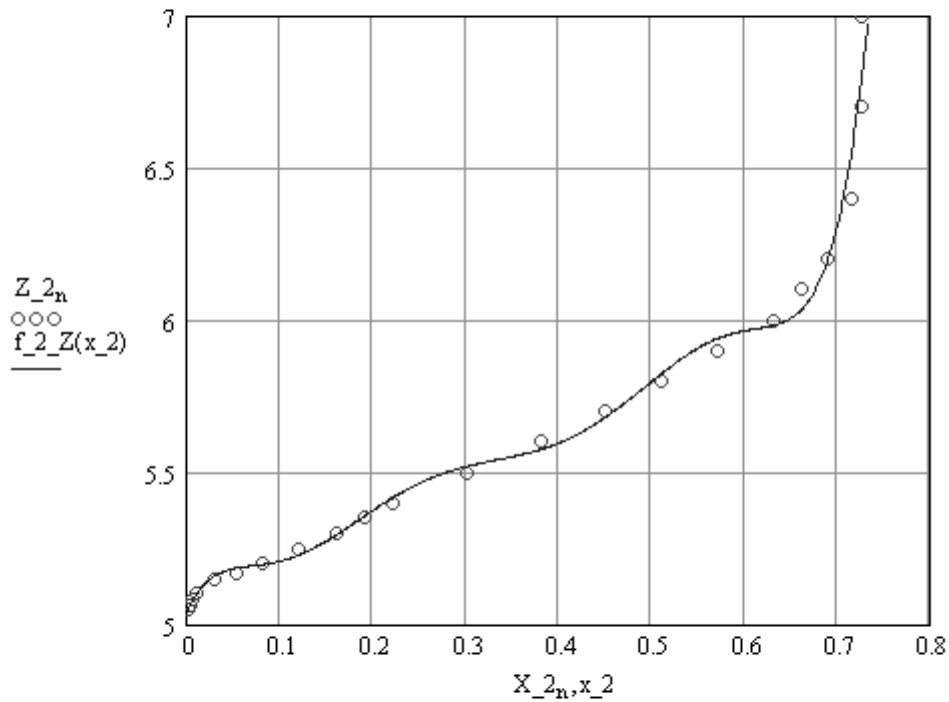


```

n := 0..rows(Data) - 17
X_2_n := Data_{n+16,0}      Z_2_n :=  $\frac{\text{Data}_{n+16,2}}{100}$ 

P_2_Z := 7
f_2_Z(x) := F(X_2,Z_2,P_2_Z,x)   x_2 := min(X_2),min(X_2) + 0.001..max(X_2) + 0.0065

```



```
Func_Lambda(x) := if(numb = 1, f_1_Z(x), f_2_Z(x))
```

```
Lambda := 100 * Func_Lambda(numb_X)
```

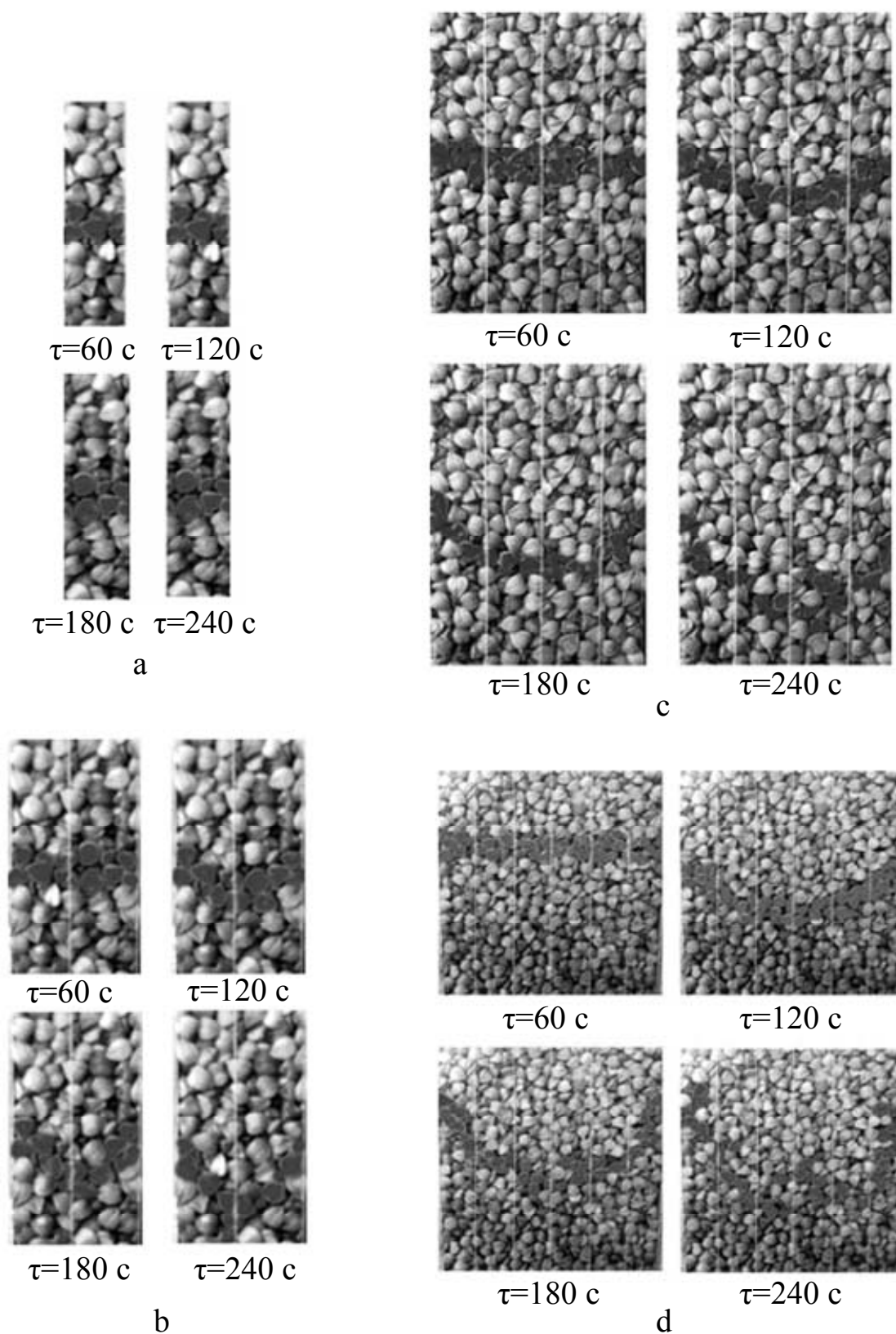
## Lambda

```
Lambda = 490.26
```



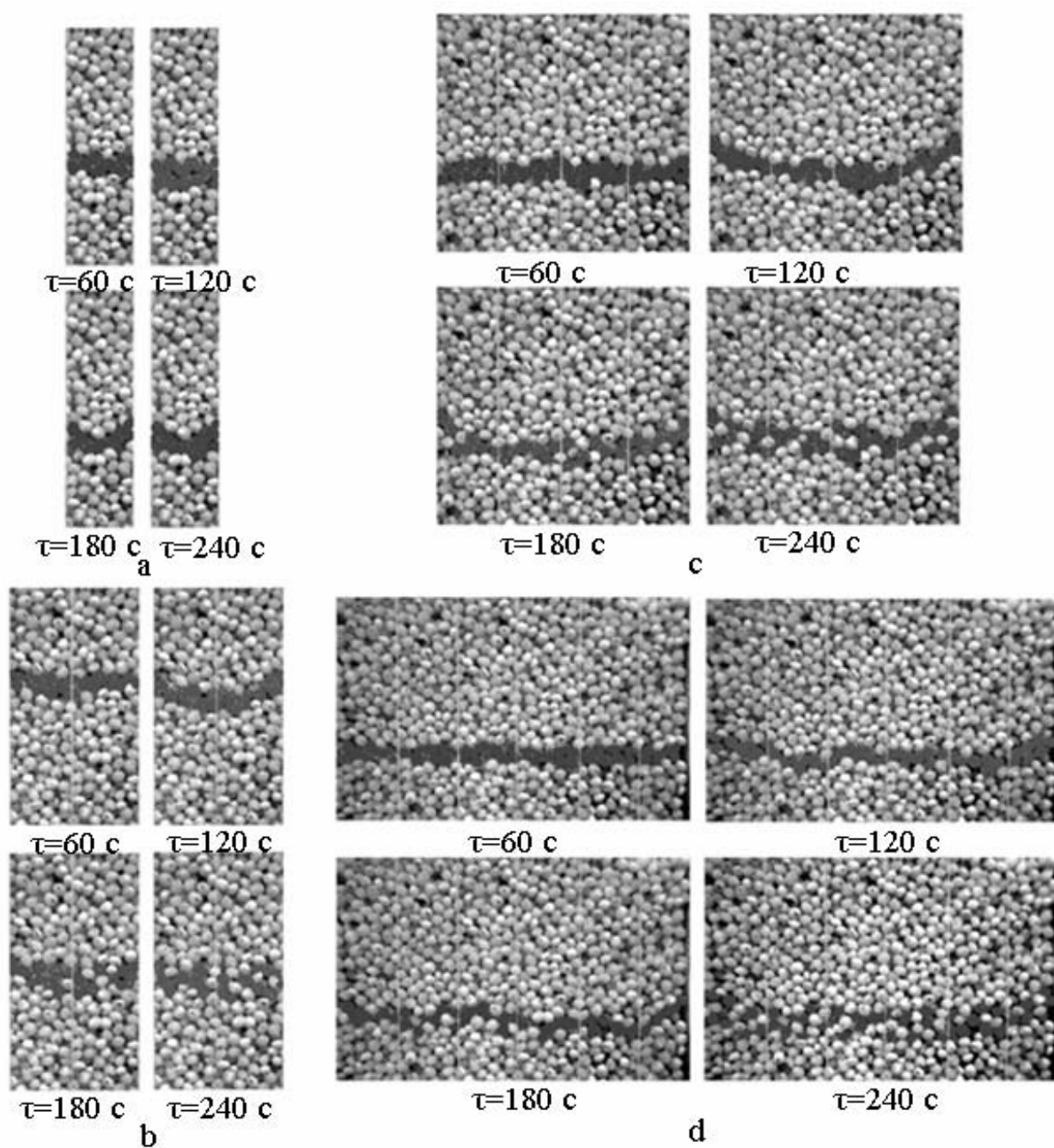
## **ДОДАТОК В**

**Фотографії плинну вологої сировини в трубі прямокутного  
перерізу**



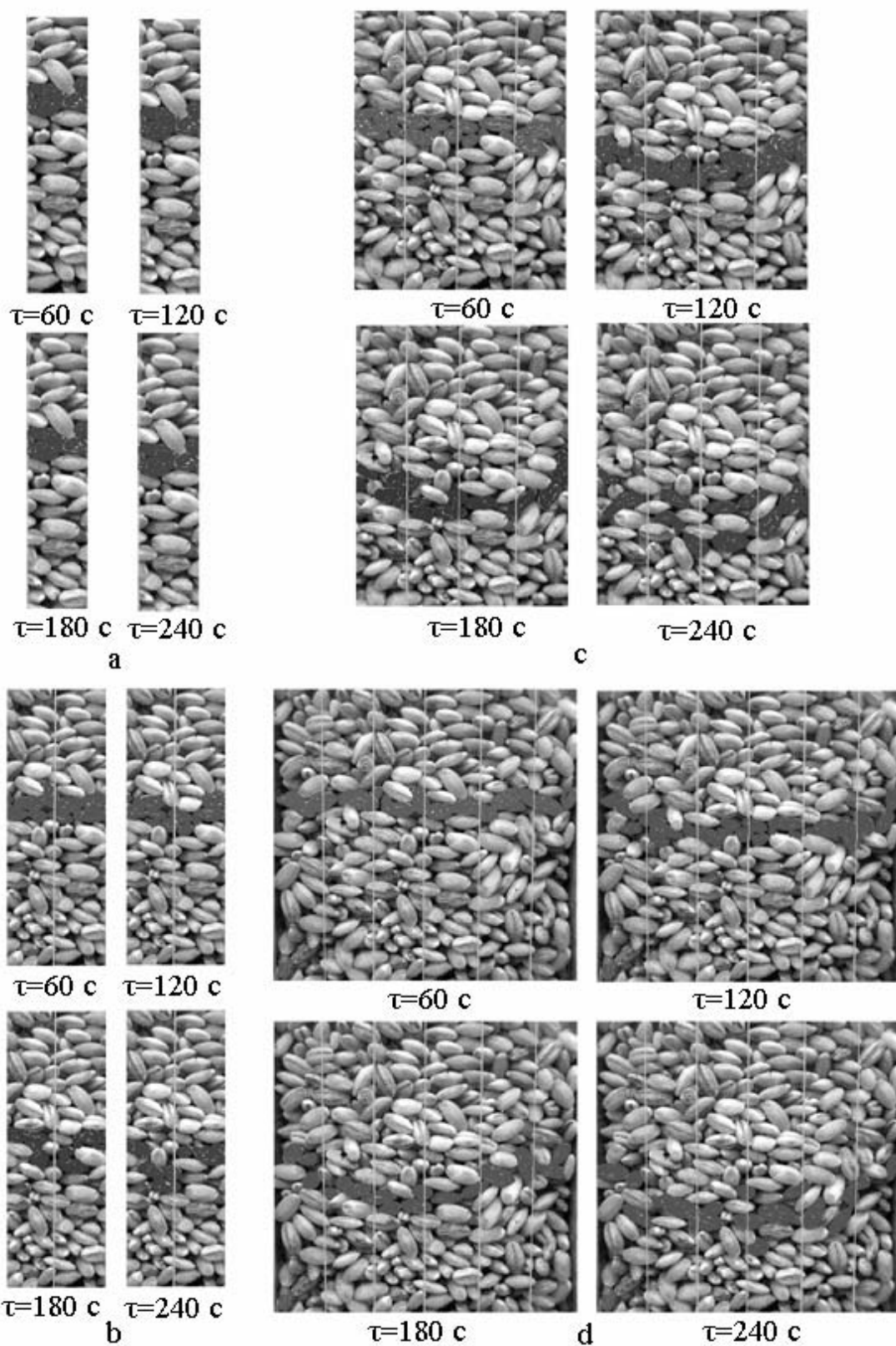
Фотографії плинну вологості гречаної крупи за різної товщини ФЄ, мм:

a – 10; b – 20; c – 40; d – 60.



Фотографії плинущої вологої пшонаної крупи за різної товщини  $\Phi_c$ , мм:

a – 10; b – 20; c – 40; d – 60.



Фотографії плинущини вологості ячмінної крупи за різної товщини ФЄ, мм:

a – 10; b – 20; c – 40; d – 60.

## **ДОДАТОК Г**

**Проект ТУ У 15.8-01566330-276:2012**

**«Каші швидковідновлювані»**

ПРОЕКТ

ДКПП

УКНД

УЗГОДЖЕНО  
Висновок державної санітарно-  
епідеміологічної експертизи

№ \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Ректор Харківського державного  
університету харчування та  
торгівлі  
д-р техн. наук, професор  
О.І. Черевко  
\_\_\_\_\_ 2012 р.



КАШІ ШВИДКОВІДНОВЛЮВАНІ  
Технічні умови

ТУ У 15.8-01566330-276:2012

Уведено вперше

Дата надання чинності « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Чинні до « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

РОЗРОБЛЕНО

Завідувач кафедри енергетики та  
фізики, д-р техн. наук, професор

 М.І. Погожик

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2012 р.

Канд. техн. наук, доцент кафедри  
енергетики та фізики

 А. О. Пак

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2012 р.

Здобувач кафедри енергетики та  
фізики

 М.В. Жеребкін

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2012 р.

ТУ У 15.8-01566330-276:2012

**ЗМІСТ**

	<b>стор.</b>
1. СФЕРА ЗАСТОСУВАННЯ.....	3
2. НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ.....	3
3. ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ.....	8
4. ВИМОГИ БЕЗПЕКИ ТА ОХОРОНИ ДОВКІЛЛЯ, УТИЛІЗАЦІЯ .....	13
5 ПРАВИЛА ПРИЙМАННЯ.....	14
6 МЕТОДИ КОНТРОЛЮ .....	15
7 ТРАНСПОРТУВАННЯ І ЗБЕРІГАННЯ.....	16
8 ГАРАНТІЇ ВИРОБНИКА .....	17

ТУ У 15.8-01566330-276:2012

## 1. СФЕРА ЗАСТОСУВАННЯ

Дані технічні умови розповсюджуються на каші швидковідновлювані, які являють собою напівфабрикати високого ступеня готовності, до складу яких входять проварені до готовності та висушені крупи.

Швидковідновлювані каші призначені для реалізації населенню в роздрібній торгівельній мережі та закладами ресторанного господарства та для подальшого використання в харчовій промисловості.

Обов'язкові вимоги до якості продукції, що забезпечують її безпеку для життя й здоров'я людей, охорони навколишнього природного середовища, викладені в пунктах п.п 3.4.2., 3.4.3, 3.4.4, 3.4.5, 3.4.6 та розділах 4 і 5.

Вимоги цих технічних умов є обов'язковими.

Приклад позначення продукції при замовленні: «Каші швидковідновлювані: Каша швидковідновлювана гречана ТУ У 15.8-01566330-276:2012»

Технічні умови є власністю Харківського державного університету харчування та торгівлі і не можуть бути використані і тиражовані підприємствами і підприємцями без письмового дозволу організації-власника оригіналу технічних умов. Дані технічні умови придатні для досягнення мети сертифікації.

Власник зобов'язаний перевіряти технічні умови регулярно, не рідше одного разу на п'ять років після реєстрації або останньої перевірки, якщо не з'явилась необхідність перевірити їх раніше в разі прийняття законодавчих актів, які регламентують інші вимоги, крім тих, що встановлені в даних технічних умовах.

## 2. НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ

В даних технічних умовах приведені посилання на наступні нормативні документи:

ДСТУ 1055:2006	Крупи, що швидко розварюються. Технічні умови
ГОСТ 10841-64	Зерно. Методы определения зараженности и поврежденности вредителями



ТУ У 15.8-01566330-276:2012

ГОСТ 572-60	Крупа пшено шлифованное. Технические условия
ГОСТ 3034-75	Крупа овсяная. Технические условия
ГОСТ 5550-74	Крупа гречневая. Технические условия
ГОСТ 5784-60	Крупа ячменная. Технические условия
ДСТУ 3768:2010	Крупа пшенична. Технічні умови
ДСТУ 4462.3.01:2006	Охрана природы. Поводження з відходами. Порядок здійснення операцій
ДСТУ 4462.3.02:2006	Охрана природы. Поводження з відходами. Пакування, маркування і захоронення відходів. Правила перевезення відходів.
ГОСТ 12.1.004-88	ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования безопасности.
ГОСТ 12.1.005-88	ССБТ. Общин санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
ГОСТ 12.2.003-91	ССБТ. Оборудование производственное. Общин требования безопасности.
ГОСТ 12.3.002-75	ССБТ. Процессы производственные. Общие требования безопасности.
ГОСТ 12.4.009-83	ССБТ. Пожарная техника для защиты объектов. Общие виды. Размещение и обслуживание.
ГОСТ 12.4.021-75	ССБТ. Системы вентиляционные. Общие требования.
ГОСТ 17.2.3.02-78	Охрана природы. Атмосфера. Правила установления Общие химические выбросы вредных веществ промышленными предприятиями.
ГОСТ 2874-82	Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль за качеством.
ГОСТ 26668-85	Продукты пищевые и вкусовые. Подготовка проб для микробиологических анализов.
ГОСТ 26927-86	Сырье и продукты пищевые. Метод определения ртути.

ТУ у 15.8-01566330-276:2012

ГОСТ 26929-94	Сырье и продукты пищевые. Подготовка проб. Минерализация для определения содержания токсичных элементов.
ГОСТ 26930-86	Сырье и продукты пищевые. Метод определения мышьяка.
ГОСТ 26931-86	Сырье и пищевые продукты. Метод определения меди.
ГОСТ 26932-86	Сырье и продукты пищевые. Метод определения свинца.
ГОСТ 26933-86	Сырье и продукты пищевые. Метод определения кадмия.
ГОСТ 26934-86	Сырье и пищевые продукты. Метод определения цинка.
ГОСТ 30178-96	Сырье и продукты пищевые. Атомно-абсорбционный метод определения токсичных элементов.
ГОСТ 30518-97	Продукты пищевые. Методы выявления и определения количества бактерий группы кишечных палочек (колиформных бактерий).
ГОСТ 30519-97	Продукты пищевые. Методы выявления бактерий рода <i>Salmonella</i> .
ГН 6.6.1.1-130-2006	Допустимі рівні вмісту радіонуклідів $^{137}\text{Cs}$ і $^{90}\text{Sr}$ у продуктах харчування та питній воді.
МУ 5778-91	Стронций-90. Определение в пищевых продуктах (Стронций-90. Визначення в харчових продуктах), Затверджені МОЗ СРСР 04.01.1991 р.
МУ 5779-91	Цезий-137. Определение в пищевых продуктах (Цезий-137. Визначення в харчових продуктах), Затверджені МОЗ СРСР 04.01.1991 р.
ДСанПіН 8.8.1.2.3.4-000-2001	Допустимі дози, концентрації, кількості та рівні вмісту пестицидів у сільськогосподарській сировині, харчових продуктах, повітрі робочої зони, атмосферному повітрі, воді водоймищ, ґрунті.
СанПіН № 42-128-4690-88	Санитарные правила и нормы по охране почвы от загрязнений бытовыми и промышленными отходами.
СанПіН 4630-88	Санитарные правила и нормы по охране поверхностных вод от загрязнений.

ТУ У 15.8-01566330-276:2012

СНиП 2.04.05-91	Отопление, вентиляция и кондиционирование.
СНиП 2.09.02-85	Производственные здания.
МР № 4.4.4.-108-2004	Періодичність контролю продовольчої сировини та харчових продуктів за показниками безпеки.
ДСТУ 3147-95	Коди та кодування інформації. Штрихове кодування. Маркування об'єктів ідентифікації. Формат та розташування штрихових позначок EAN на тарі та пакуванні товарної продукції. Загальні вимоги.
ГОСТ 10444.2-94	Продукты пищевые. Методы выявления и определения количества <i>Staphylococcus aureus</i> .
ГОСТ 10444.12-88	Продукты пищевые. Методы определения дрожжей и плесневых грибов.
ГОСТ 10444.15-94	Продукты пищевые. Методы определения количества мезофильных аэробных и факультативноанаэробных микроорганизмов.
ГОСТ 12302-80	Пакеты из полимерных материалов. Общие технические условия.
ГОСТ 1419-77	Маркировка грузов.
ГОСТ 24297-87	Входной контроль продукции. Основные положения.
ДСТУ 4117:2007	Зерно та продукти його переробки. Визначення показників якості методом інфрачервоної спектроскопії
МР № 2273-80	Методические рекомендации по обнаружению, идентификации и определению содержания афлатоксинов в пищевых продуктах.
МУ № 2657-821	Методические указания по санитарно-микробиологическому контролю на предприятиях общественного питания и торговли пищевыми продуктами.

	ТУ У 15.8-01566330-276:2012
МУ № 4082-86	Методические указания по обнаружению, идентификации и определению содержания афлатоксинов в продовольственном сырье и пищевых продуктах с помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии.
ДБН В.2.5-28-2006	Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення.
ДСН 3.3.6.042-99	Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
ДСП № 201-97	Государственные санитарные правила охраны атмосферного воздуха населенных мест (от загрязнения химическими и биологическими веществами).
Закон України №1393 – XIV від 14.01.2000 р.	Закон України «Про вилучення з обігу, переробку, утилізацію, знищення або подальше використання неякісної та небезпечної продукції».
Закон України №771/97-ВР	Про безпечність та якість харчових продуктів.
Закон України №1778-17	Про внесення змін до Закону України «Про безпечність та якість харчових продуктів» щодо інформування громадян про наявність у харчових продуктах генетично-модифікованих організмів (ГМО)
Наказ МОЗ України №971 від 9 листопада 2010р.	Наказ «Про затвердження Переліку харчових продуктів, щодо яких здійснюється контроль вмісту генетично модифікованих організмів»
Постанова Кабінету Міністрів України №468 від 13 травня 2009р.	«Про затвердження Порядку етикування харчових продуктів, які містять генетично модифіковані організми або вироблені з їх використанням та вводяться в обіг»

ТУ у 15.8-01566330-276:2012

Наказ №280 від 23.07.2002	Щодо організації проведення обов'язкових профілактичних медичних оглядів працівників окремих професій, виробничих організацій, діяльність яких пов'язана з обслуговуванням населення і може призвести до поширення інфекційних хвороб.
Технічний	регламент щодо правил маркування харчових продуктів, затверджених наказом Держспоживстандарту № 487 від 28.10.2010р.

### 3. ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ

3.1 Каші швидковідновлювані виробляються відповідно до вимог даних технічних умов за технологічною інструкцією і рецептурами, затвердженими у встановленому порядку, з дотриманням санітарних норм і правил, затверджених у встановленому порядку.

#### 3.2 Асортимент

**Каші швидковідновлювані** виробляються в наступному асортименті:

- «Гречана»;
- «Пшоняна»;
- «Ячмінна»;
- «Пшенична».

#### 3.3 Вимоги до сировини та матеріалів

3.3.1 Сировина та матеріали, що використовуються для виробництва каш швидковідновлюваних, повинні відповідати вимогам діючої нормативної документації:

- крупа гречана за ГОСТ 5550-74;
- крупа пшоняна за ГОСТ 572-60;
- крупа ячмінна за ГОСТ 5784-60;
- крупа пшенична за ДСТУ 3768:2010

ТУ У 15.8-01566330-276:2012

вода питна за ГОСТ 2874-82.

3.3.2 При виробництві швидковідновлюваних каш повинна використовуватися сировина, яка за показниками безпеки відповідає вимогам МБТ і СН № 5061, ГН 6.6.1.1-130, ДСан Пін 8.8.1.2.3.4-000.

3.3.3 Кожна партія сировини, що надходить на виробництво, повинна супроводжуватися документом про якість установленої форми, що підтверджує відповідність якості і безпеки діючим нормативним документам і санітарним нормам і правилам, в тому числі протоколи випробувань відносно вмісту ГМО.

3.3.4 Вхідний контроль якості сировини та матеріалів, що надходять на виробництво швидковідновлюваних каш, повинен здійснюватись по кожній партії у відповідності до ГОСТ 24297.

3.4 Характеристика продукції.

3.4.1 За органолептичними показниками швидковідновлювані каші повинні відповідати вимогам, зазначеним у таблиці 1.

Таблиця 1 – Органолептичні показники швидковідновлюваних каш готових до споживання

Найменування каші	Найменування показників	органолептичні показники
«Гречана»	Зовнішній вигляд і консистенція	Густа в міру однорідна каша
	Смак і запах	Властиві сировині, що використовується, без стороннього присмаку та запаху
	Колір	Властивий сировині яка використовується
«Пшоняна»	Зовнішній вигляд	Густа в міру однорідна каша
	Смак і запах	Властиві сировині, що використовується, без стороннього присмаку та запаху
	Колір	Властивий сировині яка використовується

ТУ у 15.8-01566330-276:2012

«Пшенична»	Зовнішній вигляд	Густа в міру однорідна каша
	Смак і запах	Властиві сировині, що використовується, без стороннього присмаку та запаху
	Колір	Властивий сировині яка використовується
«Ячмінна»	Зовнішній вигляд	Густа в міру однорідна каша
	Смак і запах	Властиві сировині, що використовується, без стороннього присмаку та запаху
	Колір	Властивий сировині яка використовується

3.4.2 Вміст токсичних елементів, нітратів та мікотоксинів у швидковідновлюваних кашах не повинен перевищувати допустимі рівні, встановлені в МБТ і СН № 5061 та приведених у таблиці 2.

Таблиця 2 – Вміст токсичних елементів, нітратів та мікотоксинів у швидковідновлювани кашах

Найменування показника	Допустимі рівні, мг/кг, не більше	Метод контролю
Свинець	0,4	ГОСТ 26932
Кадмій	0,03	ГОСТ 26933
Миш'як	0,2	ГОСТ 26930
Ртуть	0,02	ГОСТ 26927
Мідь	5,0	ГОСТ 26931
Цинк	10,0	ГОСТ 26934
Нітрати	60	ГОСТ 29270
Мікотоксини: Афлатоксин В <sub>1</sub>	0,005	МР № 2273-80, МУ №4082
Патулін	0,05	ГОСТ 28038

3.4.3 Залишкова кількість пестицидів та нітратів у швидковідновлюваних кашах не повинна перевищувати допустимих рівнів, установлених ДСанПіН 8.8.1.2.3.4-000, МБТ і СН № 5061 та нормується у сировині.

ТУ у 15.8-01566330-276:2012

3.4.4 Вміст радіонуклідів у швидковідновлюваних кашах не повинен перевищувати допустимі рівні, встановлені ГН 6.6.1.1-130 і вказані в таблиці 3.

Таблиця 3 – Вміст радіонуклідів у швидковідновлюваних кашах

Найменування показника	Допустимі рівні, Бк/кг
$^{137}\text{Cs}$	70
$^{90}\text{Sr}$	10

3.4.5 За мікробіологічними показниками швидковідновлювані каші повинні відповідати вимогам, вказаним у таблиці 4.

Таблиця 4 – Мікробіологічні показники швидковідновлюваних каш

Найменування показника	Норма	Метод контролю
Кількість мезофільних аеробних й факультативно-анаеробних мікроорганізмів, КОЕ в 1г, не більше	$1 \times 10^3$	МУ 2657 ГОСТ 10444.15
Маса продукту (г), в якій не допускається: - БГКП (коліформи) - Патогенні, у т.ч. сальмонели	0,01 г 25	МУ 2657 ГОСТ 30518 ГОСТ 10444.2 ГОСТ 30519
- Пліснява, КУО у 1г, не більше - Дріжджі, КУО у 1г, не більше	$1 \times 10^2$ $1 \times 10^3$	ГОСТ 10444.12

3.4.6 Інформаційні дані про калорійність (енергетичну цінність) та поживну цінність приведені у додатку А.

### 3.5 Упаковка

3.5.1 Тара і упаковка для швидковідновлюваних каш повинна відповідати вимогам діючої в Україні нормативної документації і забезпечувати збереження при транспортуванні й зберіганні.

Каші фасують масою нетто 200 г у споживчу тару: тару з полімерних матеріалів, поліпропіленові пакети за діючою нормативною документацією.



ТУ У 15.8-01566330-276:2012

3.5.2 Припустимі відхилення від номінальної маси нетто одиниці продукту у споживчій упаковці не повинні перевищувати мінус 3%.

Перевищення маси нетто від встановленої норми у більшу сторону не обмежуються.

Фасована продукція повинна бути упакована в транспортну тару за ГОСТ 9421, ГОСТ 9142 або іншу тару, дозволена до використання Центральним органом виконавчої влади в сфері охорони здоров'я.

Маса нетто продукції у транспортній тарі не повинна перевищувати 20 кг.

3.6 Маркування повинне відповідати вимогам Закону України № 771/ВР-97, ст. 38.

3.6.1 На кожну одиницю продукту у споживчій тарі друкарським способом незмивною фарбою наносять наступні позначення:

- назву харчового продукту;
- назву та повну адресу і телефон виробника, адресу потужностей (об'єкта) виробництва;
- кількість нетто харчового продукту у встановлених одиницях виміру;
- склад харчового продукту в порядку переваги складників;
- калорійність (енергетичну цінність) та поживну цінність з вказівкою на 100 грамів харчового продукту кількості білків, жирів і вуглеводів у встановлених одиницях виміру;
- кінцеву дату споживання „Вжити до” або дату виробництва та строк придатності;
- номер партії виробництва;
- умови зберігання та використання;
- позначення даних технічних умов;
- інформація щодо наявності або відсутності у складі продукту генетично-модифікованих організмів, у вигляді напису «з ГМО» або «без ГМО», відповідно;
- штриховий код.

3.6.2 Маркування повинно проводитись шляхом нанесення безпосередньо друкарськими фарбами на упаковку, що дозволені Центральним органом

ТУ У 15.8-01566330-276:2012

виконавчої влади в сфері охорони здоров'я для використання в харчовій промисловості на пакувальний матеріал. Допускається нанесення іншої інформації, що не суперечить законодавчим актам України.

3.6.3 Маркування, що характеризує продукцію в транспортній тарі, наноситься на одну з торцевих сторін транспортної тари фарбою, яка не змивається та не пахне, за допомогою штампку, трафарету або наклеювання етикетки за ГОСТ 14192 з вказівкою наступних додаткових позначень:

- назву харчового продукту;
- назву та повну адресу і телефон виробника, адресу потужностей (об'єкта) виробництва;
- масу нетто одиниці транспортної тари, кг;
- кількість пакувальних одиниць та масу нетто одиниці споживчої тари, г;
- кінцеву дату споживання „Вжити до” або дату виробництва та строк придатності;
- умови зберігання;
- номер партії виробництва;
- позначення даних технічних умов;

3.6.4 Маркувальні реквізити повинні бути виконані на державній мові, а також допускається на мові замовника в відповідності з умовами договору.

#### **4. ВИМОГИ БЕЗПЕКИ ТА ОХОРОНИ ДОВКІЛЛЯ, УТИЛІЗАЦІЯ**

4.1 Технологічний процес і обладнання повинні відповідати вимогам безпеки ГОСТ 12.3.002.

4.2 Виробничі приміщення та устаткування повинні відповідати вимогам ГОСТ 12.1.004, природне та штучне освітлення відповідно до вимог ДБН В 2.5-28, мікроклімат відповідно до ГОСТ 12.1.005 та ДСН 3.3.6.042.

4.3 Охорона праці робітників на підприємствах здійснюється відповідно до ГОСТ 12.1.005.

ТУ у 15.8-01566330-276:2012

4.4 Гранично припустимий рівень шкідливих речовин у повітрі робочої зони і мікроклімат виробничих приміщень повинні відповідати ГОСТ 12.1.005, ДСН 3.3.6.042.

4.5 Виробничі приміщення повинні відповідати вимогам СНиП 2.09.02 і бути обладнані загальною приточно-витяжною вентиляцією відповідно до вимог ГОСТ 12.4.021 і СНиП 2.04.05.

4.6 Пожежна безпека і розміщення засобів пожежегасіння повинні відповідати вимогам ГОСТ 12.1.004, ГОСТ 12.4.009.

4.7 До роботи з виробництва швидковідновлюваних каш допускаються особи, що пройшли попередній і періодичний медогляд відповідно до вимог наказу № 280 від 23.07.2002 р. Центрального органу виконавчої влади в сфері охорони здоров'я України „Щодо організації проведення обов'язкових профілактичних медичних оглядів працівників окремих професій, виробничих організацій, діяльність яких пов'язана з обслуговуванням населення і може призвести до поширення інфекційних хвороб”.

4.8 Стічні води повинні відповідати вимогам СанПіН 4630.

4.9 Контроль за викидами шкідливих речовин у атмосферу здійснюється відповідно до ГОСТ 17.2.3.02 і ДСП № 201.

4.10 Охорона ґрунту від забруднень побутовими і промисловими відходами повинна відповідати вимогам СанПіН 42-128-4690.

4.11 Утилізація неякісної та небезпечної продукції повинна проводитись згідно Закону України №1393-14 від 14.01.2000 р. „Про вилучення з обігу, переробку, утилізацію, знищення, або подальше використання неякісної та небезпечної продукції”, а також згідно ДСТУ 4462.3.01:2006 «Охорона природи. Поводження з відходами. Порядок здійснення операцій», ДСТУ 4462.3.02:2006 «Охорона природи. Поводження з відходами. Пакування, маркування і захоронення відходів. Правила перевезення відходів».

## **5 ПРАВИЛА ПРИЙМАННЯ**

5.1 Приймання швидковідновлюваних каш здійснюють за ГОСТ 26313.

ТУ У 15.8-01566330-276:2012

5.2 Продукцію приймають партіями. Під партією розуміють будь-яку визначену кількість харчового продукту однієї дати виготовлення, з однаковою назвою та якісними показниками, який вироблений за однакових умов на одній і тій же самій потужності. Кожна партія швидковідновлюваних каш повинна супроводжуватися документом встановленої форми, що засвідчує якість продукції.

5.3 Для перевірки відповідності швидковідновлюваних каш вимогам дійсних технічних умов підприємство-виробник проводить приймально-здавальний і періодичний контроль продукції.

При проведенні приймально-здавального контролю в кожній партії визначають органолептичні, фізико-хімічні показники, якість пакування й маркування, масу нетто одиниці пакування.

5.4 Періодичність контролю на вміст токсичних елементів, мікотоксинів, пестицидів, нітратів і радіологічного забруднення встановлюється відповідно до методичних вказівок МР 4.4.4.-108.

5.5 Аналіз продукції за мікробіологічними показниками здійснюється за узгодженням з Центральним органом виконавчої влади в сфері охорони здоров'я, але не рідше 1 разу на місяць. Аналіз на наявність патогенних мікроорганізмів проводиться в порядку державного санітарного контролю санітарно-епідеміологічними станціями відповідно до методів, які затверджені Центральним органом виконавчої влади в сфері охорони здоров'я.

5.6 При отриманні незадовільних результатів хоча б по одному з показників по ньому проводять повторне випробування на подвоєній вибірці. Результати повторних випробувань розповсюджують на всю партію.

## **6 МЕТОДИ КОНТРОЛЮ**

6.1 Відбір і підготовка проб здійснюється відповідно до ГОСТ 26313, ГОСТ 8756, підготовка проб до лабораторних аналізів – за ГОСТ 26671.

6.2 Зовнішній вигляд, колір і консистенція продукту визначається візуально, смак і запах – органолептично, відповідно до ГОСТ 8756.1.

ТУ У 15.8-01566330-276:2012

6.3 Підготовку зразків та визначення токсичних елементів здійснюють відповідно ГОСТ 26932, ГОСТ 30178, ГОСТ 26933, ГОСТ 26930, ГОСТ 26927, ГОСТ 26931, ГОСТ 26934.

6.4 Визначення радіонуклідів проводиться відповідно до методик, затверджених в установленому порядку.

6.5 Визначення мікотоксинів проводиться відповідно до МР №2273, МУ №4082, ГОСТ 28038.

6.6 Визначення пестицидів проводиться відповідно до ДСанПіН 8.8.1.2.3.4-000 та ГОСТ 30349, нітратів – до ГОСТ 29270.

6.7 Визначення мікробіологічних показників проводять за ГОСТ 10444.2, ГОСТ 10444.12, ГОСТ 10444.15, ГОСТ 30518, ГОСТ 30519 і інших методів, затверджених Центральним органом виконавчої влади в сфері охорони здоров'я. Визначення патогенних мікроорганізмів, у т.ч. сальмонел, проводять відповідно до діючої „Інструкція про порядок розгляду, обліку й проведення лабораторних досліджень в установах санітарно-епідеміологічної служби при харчових отруєннях” №1135 і методик, затверджених Центральним органом виконавчої влади в сфері охорони здоров'я.

6.8 Відбір проб для визначення вмісту генетично-модифікованих організмів здійснюють відповідно до ДСТУ-П CEN/TS 15568.

Визначення вмісту генетично-модифікованих організмів здійснюють у відповідності з ДСТУ ISO 21569, ДСТУ ISO 21570, ДСТУ ISO 21571, ДСТУ ISO 21576 та ДСТУ ISO 21098.

6.9 Масу нетто визначають згідно ГОСТ 8756.1.

## **7 ТРАНСПОРТУВАННЯ І ЗБЕРІГАННЯ**

7.1 Каші швидковідновлювані транспортують всіма видами транспорту в критих вантажних засобах відповідно до правил перевезень вантажів, що діють на відповідних видах транспорту.

ТУ У 15.8-01566330-276:2012

7.2 Каші швидковідновлювані зберігають у чистих, добре вентиляваних приміщеннях за температури від 0°C до 25°C за відносної вологості повітря не більше 75%.

7.3 Строк зберігання за вказаних умов 12 місяців від дати виготовлення.

## **8 ГАРАНТІЇ ВИРОБНИКА**

8.1 Виробник гарантує відповідність якості продукції вимогам дійсних технічних умов при дотриманні умов зберігання й транспортування.

8.2 Строк придатності швидковідновлюваних каш – 12 місяців від дати виготовлення.

ТУ У 15.8-01566330-276:2012

**ДОДАТОК А**  
**(обов'язковий)**

**ІНФОРМАЦІЙНІ ДАНІ ПРО КАЛОРІЙНІСТЬ (ЕНЕРГЕТИЧНУ ЦІННІСТЬ) ТА ПОЖИВНУ (ХАРЧОВУ) ЦІННІСТЬ 100 г ШВИДКОВІДНОВЛЮВАНИХ КАШ**

Найменування швидковідновлюваної каші	Поживна цінність			Калорійність (енергетична цінність)
	Вміст білків	Вміст жирів	Вміст вуглеводів	
	г	г	г	кДж / ккал
«Гречана»	3,6	2,2	17,1	413/98,7
«Пшоняна»	2,4	2,9	22,7	507/121,3
«Пшенична»	16	1	70	1402/335,5
«Ячмінна»	10	1,3	65,4	1308/313

ТУ У 15.8-01566330-276:2012

## ЛИСТ РЕЄСТРАЦІ ЗМІН

Номер зміни	Номери сторінок				Всього сторінок після внесення змін	Інформація про надходження зміни (номер супровідного листа)	Підпис особи, що внесла зміну	Прізвище цієї особи і дата внесення зміни
	заміненних	нових	анульованих	змінених				
1	2	3	4	5	6	7	8	9



## **ДОДАТОК Д**

### **Акти впровадження результатів наукових досліджень у виробництво**

- Д.1. Акт випуску дослідних партій швидковідновлюваних каш на ТОВ «Терра» (м. Первомайський, Харківська обл.)**
- Д.2. Акт випуску дослідних партій швидковідновлюваних каш на ТОВ «Спільне україно-німецьке підприємство «Злаки» (м. Полтава)**
- Д.3. Акт впровадження рекомендацій з підвищення енергоефективності переробки сільськогосподарської продукції на ПСП ім. Т.Г. Шевченка (с. В. Івани, Богодухівський р-н, Харківська обл.)**
- Д.4. Акт впровадження рекомендації, щодо раціональних режимів гідротермічної обробки та сушіння сировини рослинного походження на ПСП ім. Т.Г. Шевченка (с. В. Івани, Богодухівський р-н, Харківська обл.)**



## 6. Впроваджені:

в промислове виробництво, процес термовологісної  
обробки зерна  
 (участок, цех\цехи, процес)  
 -в проектні роботи \_\_\_\_\_  
 (вказати об'єкт, підприємство)

7. Річний економічний ефект (розрахунок додається)  
 очікуваний \_\_\_\_\_ тис.грн.  
 (від впровадження в проект)  
 фактичний \_\_\_\_\_ тис.грн.  
 у тому числі часткова (дольова) участь ВНЗу \_\_\_\_\_ тис.грн.  
 (% , цифрами і прописом )

8. Питома економічна ефективність впровадження  
 результатів \_\_\_\_\_ тис.грн.

9. Обсяг впровадження \_\_\_\_\_  
 що становить \_\_\_\_\_ від обсягу впровадження,  
 що покладено в основу розрахунку гарантованого економічного ефекту, який  
 розраховано по закінченні НДР:  $E_{гар.} =$  \_\_\_\_\_ тис.грн.,  
 а під час поетапного впровадження:  $E_{гар.}$  \_\_\_\_\_ під час укладення  
 договору.

10. Соціальний і науково-технічний ефект розроблена і реалізована  
продукція, готова до вживання, яка сприяє розширенню асортименту та  
може бути використана як у закладах ресторанного господарства,  
 (охорона навколишнього середовища, надр; оздоровлення та

так і споживачами в домашніх умовах  
 покращення умов праці, удосконалення структури управління,  
 науково-технічних напрямків, спеціальні призначення і т.п. )

ВІД ВНЗУ

Зав. кафедрою енергетики та  
 фізики д.т.н., проф.

Погожих М.І.  
 (підпис) П.І.Б.

Автор розробки,  
 відповідальний за впровадження,

Жеребкін М.В.  
 (підпис) П.І.Б.

ВІД ПІДПРИЄМСТВА

Головний бухгалтер

Калайда А.І.  
 (підпис) П.І.Б.

## Додаток Д.2

Міністерство освіти і науки України  
Харківський державний університет харчування та торгівлі

ПОГОДЖЕНО



ЗАТВЕРДЖУЮ

Керівник підприємства  
Директор ТОВ "Спільне українсько-німецьке підприємство "Злаки"  
Котенко С.А.  
"13" \* 09 2011 р.

А К Т

ВПРОВАДЖЕННЯ НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ РОБОТИ

Замовник ТОВ "Спільне українсько-німецьке підприємство "Злаки" м. Полтава  
(найменування організації)

Директор Котенко С.А.

( П.І.Б. керівника організації )

Цим актом підтверджується, що результати роботи, яку виконано на тему  
«Розробка процесу термовологістної обробки зерна за допомогою сушіння змішаним теплопідводом»

(найменування теми, № держ.реєстрації)

кафедрі енергетики та фізики ХДУХТ

вартістю \_\_\_\_\_

(цифрами та прописом)

яка виконувалася з \_\_\_\_\_ по \_\_\_\_\_  
впроваджені ТОВ "Спільне українсько-німецьке підприємство "Злаки" м. Полтава

(найменування підприємства, де здійснювалось впровадження)

1. Вид впроваджених результатів експлуатація технології та виробу  
(експлуатація виробу, роботи,

технології; виробництво виробу, роботи, технології,  
функціонування систем)

2. Характеристика масштабу впровадження дослідно-промисловий зразок

(унікальне, одиночне, партія, масове, серійне )

3. Форма впровадження: виробничий випуск

Методика (метод) \_\_\_\_\_

4. Новизна результатів науково-дослідних робіт: принципово нові

(піонерські, принципово нові, якісно нові, модифікація,  
модернізація старих розробок )

5. Дослідно-промислова перевірка № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_

(вказати номер і дату актів випробувань, найменування підприємства, період)

## 6. Впроваджені:

в промислове виробництво борошно із зерна отриманого в процесі термовологістної обробки за допомогою сушіння змішаним теплопідводом

(участок, цех/цехи, процес)

-в проектні роботи \_\_\_\_\_  
(вказати об'єкт, підприємство)

## 7. Річний економічний ефект (розрахунок додається)

очікуваний \_\_\_\_\_ тис.грн.  
(від впровадження в проект)

фактичний \_\_\_\_\_ тис.грн.  
у тому числі часткова (дольова) участь ВНЗу \_\_\_\_\_ тис.грн.

(%, цифрами і прописом)

## 8. Питома економічна ефективність впровадження

результатів \_\_\_\_\_ тис.грн.

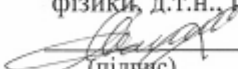
9. Обсяг впровадження \_\_\_\_\_  
що становить \_\_\_\_\_ від обсягу впровадження,  
що покладено в основу розрахунку гарантованого економічного ефекту, який  
розраховано по закінченні НДР:  $E_{гар.} =$  \_\_\_\_\_ тис.грн.,  
а під час поетапного впровадження:  $E_{гар.}$  \_\_\_\_\_ під час укладення  
договору.

10. Соціальний і науково-технічний ефект розроблена і реалізована  
продукція, готова до вживання, яка сприяє розширенню асортименту та  
може бути використана як у закладах ресторанного господарства,  
(охорона навколишнього середовища, надр; оздоровлення та


так і споживачами в домашніх умовах  
покращення умов праці, удосконалення структури управління,  
науково-технічних напрямків, спеціальні призначення і т.п.)

ВІД ВНЗУ

Зав. кафедрою енергетики та  
фізики, д.т.н., проф.

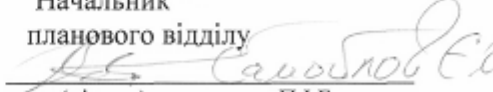
 Погожих М.І.  
(підпис) П.І.Б.

Автор розробки,  
відповідальний за впровадження,

 Жербкін М.В.  
(підпис) П.І.Б.

ВІД ПІДПРИЄМСТВА

Начальник  
планового відділу

 Савоблоб С.А.  
(підпис) П.І.Б.

Головний бухгалтер

 Журавко А.В.  
(підпис) П.І.Б.

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Харківський державний університет харчування та торгівлі



О.І.Черевко  
прізвище, ініціали

02 20/5 р



В.М.Євтушенко  
прізвище, ініціали

02 20/5 р

### А К Т ВПРОВАДЖЕННЯ НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ РОБОТИ

Замовник ПСП ім.Т.Г.Шевченка  
(найменування організації)

В.М.Євтушенко  
( П.І.Б. керівника організації )

Цим актом підтверджується, що результати роботи, яку виконано на тему:

Аналіз енергоефективності механічних та теплових процесів під час переробки сільськогосподарської сировини,  
0114U005577

(найменування теми, № держ.реєстрації)

на кафедрі енергетики та фізики  
вартістю 8500,грн. (вісім тисяч п'ятсот грн.)  
(цифрами та прописом)

яка виконувалася  
з 14.11.2014 по 01.03.2015

впроваджені \_\_\_\_\_  
(найменування підприємства, де здійснювалось впровадження)

1. Вид впроваджених результатів рекомендацій з визначення  
(експлуатація виробу, роботи,  
енергоефективності механічних та теплових процесів під час переробки  
сільськогосподарської сировини  
технології; виробництво виробу, роботи, технології,

функціонування систем)

2. Характеристика масштабу впровадження одиначне

(унікальне, одиначне, партія, масове, серійне )

3. Форма впровадження:

Методика (метод) визначення енергоефективності механічних та  
теплових процесів під час переробки сільськогосподарської сировини

4. Новизна результатів науково-дослідних робіт: \_\_\_\_\_

модернізація старих розробок

(піонерські, принципово нові, якісно нові, модифікація, модернізація старих розробок )

5. Дослідно-промислова перевірка \_\_\_\_\_

(вказати номер і дату актів)

випробувань, найменування підприємства, період)

**6. Впроваджені:**

-в промислове виробництво \_\_\_\_\_

(участок, цех\цехи, процес)

-в проектні роботи \_\_\_\_\_

(вказати об'єкт, підприємство)

цех переробки сільськогосподарської сировини**7. Річний економічний ефект (розрахунок додається)**

очікуваний \_\_\_\_\_ не розраховується \_\_\_\_\_ тис.грн.

(від впровадження в проект)

фактичний \_\_\_\_\_ не розраховується \_\_\_\_\_ тис.грн.

у тому числі часткова (дольова) участь ВНЗу

\_\_\_\_\_ не розраховується \_\_\_\_\_ тис.грн.

(%, цифрами і прописом)

**8. Питома економічна ефективність впровадження**

результатів \_\_\_\_\_ не розраховується \_\_\_\_\_ тис.грн.

**9. Обсяг впровадження**

що становить \_\_\_\_\_ від обсягу впровадження,

що покладено в основу розрахунку гарантованого економічного ефекту, який

розраховано по закінченні НДР: Е<sub>гар.</sub>= \_\_\_\_\_ тис.грн.,а під час поетапного впровадження: Е<sub>гар.</sub> \_\_\_\_\_ під час укладення

договору.

**10. Соціальний і науково-технічний ефект ефект \_\_\_\_\_ полягає у використанні запропонованих рекомендацій з підвищення енергоефективності**

(охорона навколишнього середовища, надр; оздоровлення та

**під час переробки сільськогосподарської сировини**

покращення умов праці, удосконалення структури управління)

Примітка. Цей акт впровадження завіряється гербовою печаттю з боку Замовника і з боку Виконавця.

Додаток: 1. Розрахунок фактичного ( очікуваного від впровадження а проект річного економічного ефекту, підписаний начальником планового відділу (начальником техніко-економічного відділу для НДР), технічного відділу, гл. бухгалтером ( для розрахунків фактичного ефекту) і завірений гербовою печаттю.

2. Довідка про соціальний ефект, підписана начальником технічного відділу, начальником планового відділу, завірена гербовою печаттю.

ВІД ВИКОНАВЦЯ

Начальник НДС

(підпис)

Л.О.Чуйко

П.І.Б.

Керівник роботи

(підпис)

М. І. Погожих

П.І.Б.

ВІД ЗАМОВНИКА

Директор ЦСГ ім.Т.Г. Шевченка

(підпис)

В.М. Євтушенко

П.І.Б.



## Міністерство освіти і науки України

## Харківський державний університет харчування та торгівлі

ПОГОДЖЕНО

Проректор з наукової роботи

ХДУХТ, д.т.н., проф.



Михайлов В.М.

(ініціали, прізвище)

20 / 7 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний директор

ПСП ім. Т.Г. Шевченка



Євтушенко В.М.

(ініціали, прізвище)

20 / 7 р.

## А К Т

## ВПРОВАДЖЕННЯ НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ РОБОТИ

Замовник ПСП ім. Т.Г. Шевченка

(найменування організації)

ген. директор Євтушенко В.М.

(П.І.Б. керівника організації)

Цим актом підтверджується, що результати роботи, яку виконано на тему: № 10-16-17 Д «Розробка раціональних режимів гідротермічної обробки рослинної сировини способом з використанням індукованого тепломасообміну» (0116U008874)

(найменування теми, № держ. реєстрації)

на кафедрі фізико-математичних та інженерно-технічних дисциплінвартістю 38000.00 грн. (тридцять вісім тис. грн. 00 коп.)

(цифрами та прописом)

яка виконувалася з 10.10.2016 по 30.06.2017впроваджені на ПСП ім. Т.Г. Шевченка

(найменування підприємства, де здійснювалось впровадження)

1. Вид впроваджених результатів Рекомендації, щодо раціональних режимів гідротермічної обробки та сушіння сировини замовника

(експлуатація виробу, роботи, технології; виробництво виробу, роботи, технології, функціонування систем)

2. Характеристика масштабу впровадження розроблено раціональні режими гідротермічної обробки гречаної крупи, одиночне

(унікальне, одиночне, партія, масове, серійне)

3. Форма впровадження:

Методика (метод) рекомендації4. Новизна результатів науково-дослідних робіт: принципово нові

(піонерські, якісно нові, модифікація, модернізація старих розробок)

5. Дослідно-промислова перевірка -

(вказати номер і дату актів випробувань)

(найменування підприємства, період)



6. Впроваджені:

- в промислове виробництво ділянка гідротермічної обробки та сушіння сировини  
(участок, цех/п, процес)

- в проектні роботи —  
(вказати об'єкт, підприємство)

7. Річний економічний ефект (розрахунок додається) \_\_\_\_\_  
очікуваний \_\_\_\_\_ тис. грн. \_\_\_\_\_  
(від впровадження в проект)

фактичний \_\_\_\_\_ тис. грн. \_\_\_\_\_  
у тому числі часткова (дольова) участь ВНЗ

\_\_\_\_\_ тис. грн. \_\_\_\_\_  
(%, цифрами і прописом)

8. Питома економічна ефективність впровадження  
результатів \_\_\_\_\_ грн/грн. \_\_\_\_\_

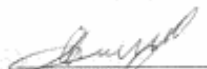
9. Обсяг впровадження \_\_\_\_\_ що становить \_\_\_\_\_ від обсягу впровадження,  
що покладено в основу розрахунку гарантованого економічного ефекту, який розраховано  
по закінченні НДР: Егар.= \_\_\_\_\_ тис. грн., а під час поетапного впровадження: Егар.  
під час укладення договору.

10. Соціальний і науково-технічний ефект Підвищення енергоефективності  
гідротермічної обробки та сушіння рослинної сировини замовника шляхом використання  
способу з індукованим масообміном

(охорона навколишнього середовища, надр, оздоровлення та покращення умов праці, удосконалення структури управління, науково-технічних напрямків, спеціальні призначення і т.п.)

#### ВІД ЗАКЛАДУ ОСВІТИ

Зав. кафедрою ФМІТД

  
(підпис) Погожих М.І.  
(ініціали, прізвище)

Керівник роботи

  
(підпис) Погожих М.І.  
(ініціали, прізвище)

#### ВІД ПІДПРИЄМСТВА

Начальник планового відділу

  
(підпис) Мусаєнко М.І.  
(ініціали, прізвище)

Головний бухгалтер

  
(підпис) \_\_\_\_\_  
(ініціали, прізвище)

## ДОВІДКА

щодо соціального ефекту від впровадження результатів науково-дослідної роботи № 10-16-17 Д «Розробка раціональних режимів гідротермічної обробки рослинної сировини способом з використанням індукованого тепломасообміну»  
(0116U008874)

Соціальний ефект від виконання науково-дослідної роботи «Розробка раціональних режимів гідротермічної обробки рослинної сировини способом з використанням індукованого тепломасообміну» ефект полягає у підвищенні енергоефективності гідротермічної обробки та сушіння рослинної сировини шляхом використання способу з індукованим тепломасообміном.

Генеральний директор  
ПСЦ ім. Т.Г. Шевченка



Свтушенко В.М.  
(ініціали, прізвище)

" 20 / 7 р.

## **ДОДАТОК Е**

### **Акти про впровадження результатів наукових досліджень у навчальний процес ХДУХТ**

**Е.1. АКТ від 06.04.2012 р.**

**Е.2. АКТ від 25.05.2015 р.**

**Е.3. АКТ від 17.05.2017 р.**

## Додаток Е.1

УЗГОДЖЕНО

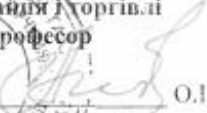
Перший проректор  
Харківського державного університету  
харчування і торгівлі  
к.т.н., професор

 Л.М. Янчева  
"06" 04 2012 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор  
Харківського державного університету  
харчування і торгівлі  
д.т.н., професор



 О.І. Червко  
"06" 04 2012 р.

УЗГОДЖЕНО

Проректор з наукової роботи  
Харківського державного університету  
харчування і торгівлі  
д.т.н., професор

 В.М. Михайлов  
"06" 04 2012 р.

## АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів науково-дослідних, дослідно-конструкторських і  
технологічних робіт у навчальний процес вищих навчальних закладів

Замовник Харківський державний університет харчування і торгівлі  
найменування організації  
ректор ХДУХТ д.т.н. проф. Червко О.І.  
П.І.Б. керівника підприємства

Дійсним актом підтверджується, що результати науково-дослідної роботи

«Розробка процесу гідротермічної обробки круп із сушального ядра з використанням  
судиння змішаним теплопідводом» (в рамках тем: №06-11-13Б (0110U006618) «Наукові  
обґрунтування енергоефективних процесів харчової промисловості»; № 2-11ФБ  
(0108U001333) «Дослідження стану та структури вологи в харчових продуктах  
методами ЯМР та ЕПР спектроскопії»)

найменування теми, № держ. реєстрації

виконаної  
кафедрою енергетики та фізики  
найменування кафедри

виконуваної  
з 01.01.2011р. по 01.01.2012 р.  
терміни виконання

**впроваджені**

Навчально-науковий інститут харчових технологій та бізнесу

найменування структурного підрозділу, де здійснювалося впровадження

**1. Вид впроваджених результатів методика**

технологія, обладнання, методики, тощо

**2. Форма впровадження** доповнення змісту лекції «Динаміка процесу сушіння» пунктом «Фізико-математична модель розподілення потужності дисипативних структур в процесі сушіння змішаним теплопідводом»

**3. Новизна результатів науково-дослідних робіт** принципово нове

піонерське, принципово нове, якісно нове, модифікації, модернізація старих розробок

**4. Перелік курсів і дисциплін, у рамках яких викладені результати НДР** «Технологія сушіння плодів та овочів»


**5. Соціальний і науково-економічний ефект** полягає у ознайомленні майбутніх спеціалістів з основними результатами досліджень за даним науковим напрямком

**Керівник НДР**

  
(підпис) Погожих М.І.  
(ініціали, прізвище)

" 6 " 04 2012 р.

Голова експертної ради по напрямку НДР  
**«Фундаментальні дослідження в галузі фізики, хімії, математики та механіки»**  
(назва наукового напрямку)

/д.т.н., проф.  Синекоп М.С.  
(науковий ступінь (підпис) (ініціали, прізвище)  
вчене звання)  
" 10 " 04 2012 р.

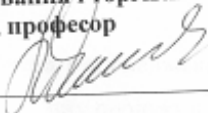
**Відповідальний за впровадження**

  
(підпис) Жербкін М.В.  
(ініціали, прізвище)


" 6 " 04 2012 р.

## Додаток Е.2

УЗГОДЖЕНО  
Перший проректор  
Харківського державного університету  
харчування і торгівлі  
к.е.н., професор

  
Л.М. Янчева  
"25" 05 2015 р.

УЗГОДЖЕНО  
Проректор з наукової роботи  
Харківського державного університету  
харчування і торгівлі  
д.т.н., професор

  
В.М. Михайлов  
"25" 05 2015 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Ректор  
Харківського державного університету  
харчування і торгівлі  
д.т.н., професор

  
О.І. Червко  
"25" 05 2015 р.



## АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів науково-дослідних, дослідно-конструкторських і  
технологічних робіт у навчальний процес вищих навчальних закладів

Замовник Харківський державний університет харчування і торгівлі.

найменування організації

ректор ХДУХТ д.т.н. проф. Червко О.І.

П.І.Б. керівника підприємства

Дійсним актом підтверджується, що результати науково-дослідної роботи  
«Удосконалення фізичних методів аналізу технологій та процесів харчових виробництв»  
13-14-16Б (0113U008396)

найменування теми, № держ. реєстрації

виконаної кафедрою енергетики та фізики

найменування кафедри

виконуваної протягом 2014/15 навч. року

терміни виконання

впроваджені у Навчально-науковому інституті харчових технологій та бізнесу ХДУХТ.

найменування структурного підрозділу, де здійснювалося впровадження

1. Вид впроваджених результатів методики дослідження системної води харчової сировини.

технологія, обладнання, методики, тощо

2. Форма впровадження лабораторні роботи з дисциплін «Технологія сушіння молока та молочних продуктів» та «Технологія сушіння плодів та овочів»: «Визначення кількості вимороженої та невимороженої вологи харчової сировини низькотемпературним калориметричним методом», «Дослідження стану вологи в капілярно-пористих колоїдних тілах методом ЕПР-спінових міток».

3. Новизна результатів науково-дослідних робіт методики включають принципово нові алгоритми обробки результатів.

піонерське, принципово нове, якісно нове, модифікації, модернізація старих розробок

4. Перелік курсів і дисциплін, у рамках яких викладені результати НДР «Технологія сушіння молока та молочних продуктів» та «Технологія сушіння плодів та овочів»

5. Соціальний і науково-економічний ефект полягає у ознайомленні майбутніх спеціалістів з основними результатами досліджень за даним науковим напрямком

Керівник НДР

  
(підпис) Погожих М.І.  
(ініціали, прізвище)

" 8 " квітень 2015 р.

Голова експертної ради по напрямку НДР  
«Фундаментальні дослідження в галузі фізики, хімії, математики та механіки»  
(назва наукового напрямку)

д.т.н., проф.  Свляш В.В.  
(науковий ступінь (підпис) (ініціали, прізвище)  
вчене звання)

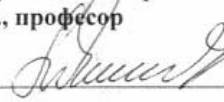
" 12 " квітень 2015 р.

Відповідальний за впровадження

  
(підпис) Пак А.О.  
(ініціали, прізвище)


" 9 " квітень 2015 р.

УЗГОДЖЕНО  
Перший проректор  
Харківського державного університету  
харчування та торгівлі  
к.е.н., професор

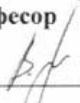
  
Л.М. Янчева  
" 17 " 05 20 17 р

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Ректор  
Харківського державного університету  
харчування та торгівлі  
д.т.н., професор



  
О.І. Черевко  
" 17 " 05 20 17 р

УЗГОДЖЕНО  
Проректор з наукової роботи  
Харківського державного університету  
харчування та торгівлі  
д.т.н., професор

  
В.М. Михайлов  
" 17 " 05 20 17 р

### АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів науково-дослідних, дослідно-конструкторських і  
технологічних робіт у навчальний процес вищих навчальних закладів

Замовник Харківський державний університет харчування та торгівлі  
найменування організації

ректор ХДУХТ д.т.н. проф. Черевко О.І.  
П.І.Б. керівника підприємства

Дійсним актом підтверджується, що результати науково-дослідної роботи  
№ 10-16-17 Д «Розробка раціональних режимів гідротермічної обробки рослинної  
сировини способом з використанням індукованого тепломасообміну» (0116U008874).  
найменування теми, № держ. реєстрації

виконаної кафедрою фізико-математичних та інженерно-технічних дисциплін  
найменування кафедри

виконуваної з 10.10.2016 по 30.06.2017  
терміни виконання

впроваджені у Навчально-науковому інституті харчових технологій та бізнесу ХДУХТ  
найменування структурного підрозділу, де здійснювалося впровадження

1. Вид впроваджених результатів Методика розрахунку апарату для гідротермічної  
обробки рослинної сировини способом з використанням індукованого тепломасообміну  
технологія, обладнання, методики, тощо



**2. Форма впровадження** доповнення змісту лекції «Загальна класифікація сушарок та їх основні схеми» пунктом «Технічна реалізація апаратів з використанням процесу ІНТМО»

**3. Новизна результатів науково-дослідних робіт** принципово нове  
піонерське, принципово нове, якісно нове, модифікації, модернізація старих розробок

**4. Перелік курсів і дисциплін, у рамках яких викладені результати НДР** «Технологія сушіння плодів та овочів», «Технологія сушіння молока та молочних продуктів»

**5. Соціальний і науково-економічний ефект** полягає у ознайомленні майбутніх спеціалістів з основними результатами досліджень за даним науковим напрямком

**Керівник НДР**

  
(підпис) \_\_\_\_\_ **Погожих М.І.**  
(ініціали, прізвище)

"26" лютого 2017 р.


**Голова експертної ради з напрямку НДР**  
**«Фундаментальні дослідження**  
**в галузі фізики, хімії, математики**  
**та механіки»**

\_\_\_\_\_ (назва наукового напрямку)

**д. т. н., проф**   
(науковий ступінь (ініціали, прізвище)  
вчене звання)

"27" лютого 2017 р.

**Відповідальний за впровадження**

  
(підпис) \_\_\_\_\_ **Пак А.О.**  
(ініціали, прізвище)

"25" лютого 2017 р.