

Секція 2. ОБЛАДНАННЯ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ І АПАРАТІВ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

УДК 64.512

ПРИРОДА АНОМАЛЬНО ВИСОКОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ГІДРОСТРУМІННОЇ ВОДОПОЛІМЕРНОЇ ОБРОБКИ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ РІЗАННЯМ

Г.В. Дейниченко, А.В. Погребняк

Природа аномально високої ефективності гідрострумінної водополімерної обробки харчових продуктів різанням добре пояснюється з точки зору сильного деформаційного впливу гідродинамічного поля на молекулярні клубки.

Обґрунтовано, що струмінь рідини, яка виходить з сопла гідроріжучої головки виявляється «армованим» сильно розгорнутими маромолекулярними ланцюгами. Частина енергії його йде на структурну перебудову потоку, що й обумовлює зниження його середньої швидкості та підвищення компактності струменя з полімерними домішками. Останнє сприяє збільшенню граничної відстані, з якої ще відбувається розрізання харчового продукту.

Розуміння природи підвищеної ріжучої здатності водополімерного струменя дозволить розробити рекомендації щодо вибору режимів гідрострумінної обробки харчових продуктів різанням.

Ключові слова: полімерний розчин, харчові продукти, поліетиленоксид, швидкість, градієнт швидкості, деформаційні ефекти.

ПРИРОДА АНОМАЛЬНО ВИСОКОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСА ГІДРОСТРУЙНОЇ ВОДОПОЛІМЕРНОЇ ОБРОБКИ ПИЩЕВИХ ПРОДУКТІВ РЕЗАННЯМ

Г.В. Дейниченко, А.В. Погребняк

Природа аномально високої ефективності гідроструйної водополімерної обробки пищевих продуктів різанням хорошо объясняется с точки зрения сильного деформационного воздействия гидродинамического поля на молекулярные клубки.

Обосновано, что выходящая струя жидкости из сопла гидрорежущей струеформирующей головки оказывается «армированной» сильно

развернутыми маромолекулярными цепями. Часть энергии ее идет на структурную перестройку потока, что и обуславливает снижение его средней скорости и увеличение компактности струи с полимерными добавками. Последнее способствует увеличению предельного расстояния, с которого еще происходит разрезание пищевого продукта.

Понимание природы повышенной режущей способности водополимерной струи позволит разработать рекомендации по выбору режимов гидроструйной обработки пищевых продуктов резанием.

Ключевые слова: полимерный раствор, пищевые продукты, полиэтиленоксид, скорость, градиент скорости, деформационные эффекты.

THE NATURE OF THE ANOMALOUSLY HIGH EFFICIENCY OF THE PROCESS OF HYDROJET WATER-POLYMER PROCESSING OF FOOD PRODUCTS BY CUTTING

G. Deynichenko, A. Pogrebnyak

The nature of the anomalously high efficiency of hydro jet water-polymer processing of food products by cutting is quite well explained from the point of view of strong deformation effect of hydrodynamic field on molecular coils. The article considers the peculiarities of macromolecule deformation behavior under conditions of a jet-shaping head that allowed to solve the issue related to the mechanism of increasing water-jet cutting power with polymer additions. In converging polyethyleneoxide solution flow macromolecules are forced by a hydrodynamic field to strong stretching that causes dynamic structure formation in solutions.

The experiments in question confirm the conclusion that the degree of hydrodynamic influence on polymer solutions is determined primarily by the magnitude of the achieved longitudinal velocity gradient and duration of the action of the stretching hydrodynamic field. It is proved that the outflow of water appears to be armed by macromolecules, decomposed to a large extent. Part of its energy goes into a structural reorganization of the flow, which leads to an increase in the compactness of the jet with polymer additives and a decrease in its average velocity. The latter circumstance is favorable for increasing the threshold distance from which the foodstuffs is still cut.

The determined regularities of macromolecules behavior in the flow under conditions of a jet-shaping head and manifested in this case effects of elastic deformations have paramount importance in understanding the mechanism of "anomalously" high cutting power of water-polymer jet. The work for the first time allows explaining the nature of the increased water-jet cutting power with polymer additions when cutting food products. Understanding the nature of the increased cutting power of water-polymer jet will make it possible to develop recommendations on choosing regimes for water-polymer jet processing of foodstuffs by cutting.

Keywords: polymer solution, foodstuff, polyethyleneoxide, velocity, hydrodynamic field, velocity gradient, deformation effects.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Наші сучасні уявлення про процес гідроструминної водополімерної обробки харчових продуктів різанням, особливо в умовах низьких температур, далекі від досконалості. У гідродинаміці гідрорізання харчових продуктів відбувається перехід від накопичення експериментальної інформації до розуміння природи гідроструминної водополімерної обробки харчових продуктів. Для вирішення технічної задачі з розробки процесу гідроструминної водополімерної обробки харчових продуктів різанням, а також принципів проектно-розрахункових проробок обладнання для його реалізації необхідно насамперед установити природу аномально високої ефективності цього процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Недовіра до ідеї, згідно з якою з'ясування природи аномально високої здатності водополімерного струменя розрізати харчові продукти однозначно пов'язане з дослідженням течій із розтягом, різко зменшилася після фундаментальних вимірювань коефіцієнта подвійного променезаломлення на закритичних режимах течії [1–3], що дозволило довести можливість фазового переходу клубок-розгорнутий ланцюг у вхідній області сопла (у подовжньому гідродинамічному полі) [4]. Останнє, за певних умов, може привести до структуроутворення в розчинах полімерів [5].

Процеси самоорганізації (структуроутворення) у нелінійних системах привертають пильну увагу у зв'язку з тим, що розуміння принципів самоорганізації та її термодинамічних основ може стати ключем до розгадки багатьох фізичних явищ, зокрема ефекту аномально високої різальної здатності водополімерного струменя. Приклад системи, що самоорганізується, у гідродинаміці давно відомий. Це так звана бенаровська нестійкість [6]. До впорядкування здатні як прості, так і складні системи в живій і в неживій природі, але фундаментальні принципи самоорганізації, встановлені І. Пригожиным і його школою, в усіх випадках однакові. Система має бути відкритою (обмінватися з довкіллям енергією і масою), нелінійною (реакція на зовнішню дію йому не пропорційна) і за критичною (перебудова від хаосу до порядку можлива лише під час переходу через критичну точку далеку від стану термодинамічної рівноваги, так звану точку біфуркації). Структуроутворення завжди супроводжується дисипацією енергії [6].

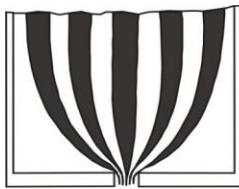
До роботи, що пропонується не було адекватного експериментального підтвердження динамічного структуроутворення (самоорганізації), тобто розділення фаз у водних розчинах поліетиленоксиду (ПЕО) під час їх протікання через сопло гідроріжучої голівки, що формує струмінь. Тому досліди, що доводять можливість динамічного структуроутворення при течії водного розчину ПЕО в

модельних умовах гідроріжучої голівки, носять принциповий характер в плані вирішення питання про природу, що обумовлює аномальну високу різальну здатність водополімерного струменя.

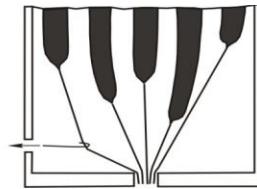
Мета статті – експериментальне встановлення природи високої ефективності процесу гідрострумної водополімерної обробки харчових продуктів різанням.

Виклад основного матеріалу дослідження. Проведені нами експериментальні дослідження показали, що самоорганізацію в просторі і в часі можна спостерігати у водних розчинах ПЕО у вхідній області сопла гідроріжучої голівки (при течії з розтягом). Для створення гідродинамічного поля з розтягом використовували потік води, що збігається до малого отвору в пластині (модель сопла) діаметром $3 \cdot 10^{-4}$ м. У потік води на достатній відстані від отвору вводили цівки розчину ПЕО молекулярної маси $6 \cdot 10^6$. Інтервал досліджуваних концентрацій 0,001–0,1%. Швидкість водного розчину ПЕО в точках його введення співпадала зі швидкістю основного потоку води. Візуалізацію течії у вхідній області отвору здійснювали за допомогою додавання фарбувальної речовини у водний розчин ПЕО, що інжектуються.

За невеликих швидкостей витікання підфарбовані цівки водного розчину ПЕО візуалізують лінії струму основного потоку (рис. 1). При цьому поведінка цівок розчинів ПЕО нічим не відрізняється від поведінки цівок чистої води, які інжектуються в збіжний потік. Досягши деякого критичного видатку води через вихідний отвір модельного сопла гідроріжучої голівки характер течії цівок водного розчину ПЕО різко змінюється. Досить товсті цівки водного розчину ПЕО трансформуються в тонкі нитки, довжина яких з часом змінюється (рис. 2).



$M_{ПЕО} = 6 \cdot 10^6$, $C_{ПЕО} = 0,03$ %, $\bar{u} < u_{кр}$



$M_{ПЕО} = 6 \cdot 10^6$, $C_{ПЕО} = 0,03$ %, $\bar{u} = 2,5$ м/с, $\bar{u} > u_{кр}$

Рис. 1. Картина течії у вхідній області отвору сопла під час інжекції водного розчину ПЕО у воду

Рис. 2. Картина течії в момент дії дрятого зонду на водополімерну нитку, що прядеться гідродинамічним полем

Унаслідок спостереження за динамікою утворення і руйнування окремих ниток (у цьому полягає пульсаційний характер руху затоплених цівок розчину ПЕО) виявляється закономірність. Спочатку в міру наближення цівок водного розчину ПЕО до отвору спостерігається їх плавне вигинання в бік отвору. При цьому все помітніше починає збільшуватися їх швидкість уздовж цих криволінійних траєкторій, про що свідчить зменшення товщини цівок. Поблизу отвору спостерігається стрибкоподібне зменшення товщини цівок водного розчину ПЕО, і вони трансформуються в тонку нитку. Область трансформування товстої цівки в тонку нитку починає переміщуватися вгору по цівкам, що призводить до збільшення довжини ниток. Оскільки цівки водного розчину ПЕО підходять до отвору неодноразово, то в кожен момент часу довжина ниток, які прядуться потоком з окремих цівок водного розчину ПЕО, неоднакова.

Коли нитка досягне деякої критичної довжини, вона в безпосередній близькості від отвору обривається. Після цього нитка, що залишилася вгорі, втрачає пружність і провисає, визначаючи одну з ліній струму основного потоку води. Коли цівка водного розчину ПЕО знову наблизиться до отвору, усе повторюється наново. Слід зазначити, що для концентрованих (за Дебаєм [7]) водних розчинів ПЕО існують такі режими витікання, коли водополімерні нитки, що утворилися, не руйнуються протягом усього часу спостереження.

Основні закономірності поведінки цівок водного розчину ПЕО під час інжекції їх у потік з розтягом, яким є основний потік води, такі ж, як і в разі витікання водного розчину ПЕО через сопло гідроріжучої голівки [5; 8]. Отже, особливості поведінки затоплених цівок водного розчину ПЕО при течії з розтягом, за якими спостерігали, обумовлені дуже сильним розгортанням клубків ПЕО під дією гідродинамічного поля, міра розгорнутості яких, як було показано раніше, може досягати ~65% [4]. Розгортання макроланцюгів ПЕО призводить до зменшення їх гнучкості, що в певних умовах викликає розподіл фаз під дією гідродинамічного поля [1; 9], тобто призводить до динамічного структуроутворення.

Підтвердженням динамічного структуроутворення під дією розтягуючого гідродинамічного поля може служити експеримент. На докритичних режимах витікання основного потоку води у вхідну область отвору вводиться тонкий дротяний зонд з пристосуванням для захоплення нитки водного розчину ПЕО. Переміщення такого зонду в перпендикулярній цівкам площині не змінює картини течії, тобто цівки водного розчину ПЕО на цих режимах течії проникли для нього. Якщо цей же експеримент повторити на закритичному режимі витікання води, то

можна захопити одну або декілька ниток водного розчину ПЕО у момент їх зростання і відвести убік, як показано на рис. 2. Це можливо лише за наявності досить сильної взаємодії між макромолекулами ПЕО, тобто за умов виникнення надмолекулярної структури, що утворюється в цьому випадку під дією розтягуючого гідродинамічного поля. Мінімальна концентрація водних розчинів ПЕО, коли ще можна було відвести убік нитку, яка прядеться гідродинамічним полем, дорівнювала 0,008%, що відповідає області розбавлених розчинів ($[\eta]_0 \cdot C_{\text{ПЕО}} < 1$, де $[\eta]_0$ – характеристична в'язкість розчину полімеру, $C_{\text{ПЕО}}$ – концентрація полімеру).

Приведені результати і результати, отримані унаслідок вивчення течій водних розчинів ПЕО у вхідній області сопла гідроріжучої голівки [4; 8], дозволяють стверджувати, що водні розчини ПЕО можна розділити, принаймні, на три області концентрацій. Це область розбавлених водних розчинів ПЕО, коли макромолекули ПЕО під дією гідродинамічного поля піддаються сильним деформаційним впливам (розгортанню), але вони все ще слабо взаємодіють між собою. Друга – область напіврозбавлених водних розчинів ПЕО (проміжна), коли на докритичних режимах течії розчини є розбавленими, а на закритичних – вже концентрованими через утворення надмолекулярних структур у результаті зміщення кривих фазового поділу під дією гідродинамічного поля. Ці динамічні структури слід віднести до класу динамічних фазових переходів, які розглядає теорія дисипативних структур. Остання область – це область концентрованих водних розчинів ПЕО ($[\eta]_0 \cdot C_{\text{ПЕО}} > 1$), коли значні взаємодії між макромолекулами ПЕО існують і без дії гідродинамічного поля. Слід звернути увагу на те, що перші дві області належать до концентрацій прояву аномально високої різальної здатності водополімерного струменя [10; 11].

Таким чином, розглянуті результати показують, що у водних розчинах ПЕО під час протікання через сопло гідроріжучої голівки може виникати динамічне структуроутворення, що підкоряється принципам самоорганізації І. Пригожина. Ці результати є визначальними для з'ясування природи прояву ефекту аномально високої ефективності процесу гідроструминної обробки харчових продуктів різанням і виникнення при цьому нелінійності.

Виявлені аномальні явища не дозволяють використовувати класичні закони гідромеханіки ньютонівської рідини для розрахунку режимів протікання водних розчинів ПЕО через сопло. Для проектних опрацювань конструктивних особливостей сопел гідроріжучої голівки потрібний закон протікання, що описує як течію ньютонівської рідини

(води), так і неньютонівської (у нашому випадку розчинів ПЕО). Нижче приведений отриманий узагальнений закон протікання через сопло гідроріжучої голівки, який справедливий як для водних розчинів ПЕО, так і для води.

Узагальнений закон протікання повинен урахувувати прояв ефектів пружних деформацій. З урахуванням закона Трутона [12] для розчинів полімерів ефективна в'язкість може бути представлена як

$$\eta_{\text{эф}} = 0,25(\eta_j + \eta_\varepsilon), \quad (1)$$

де η_j – в'язкість під час зсувної течії; η_ε – в'язкість під час течії з розтягом.

Підставивши (1) в лінійне рівняння течії [13] замість звичайної зсувної в'язкості, отримаємо узагальнений закон у вигляді двох доданків, відповідальних за різні види течій – зсувна і з розтягом:

$$\frac{\Delta P}{L_n} = \eta_j \frac{V'_\phi}{4A} + \eta_\varepsilon \frac{V'_\phi}{4A}, \quad (2)$$

де ΔP – перепад тиску на довжині отвору сопла; V'_ϕ – швидкість витікання; A – коефіцієнт проникності сопла гідроріжучої голівки.

В'язкість водних розчинів полімеру за зсувної течії і за течії з розтягом визначають експериментально або використовують для цього відомі емпіричні формули у вигляді степеневого закону [12]:

$$\eta_j = \mu_j^{c_2-1}, \quad (3)$$

$$\eta_\varepsilon = \mu_\varepsilon^{3c_1-3}, \quad (4)$$

де μ , c_1 , c_2 – емпіричні постійні.

За $c_1 = c_2 = 1$ маємо ньютонівську рідину, для якої згідно з (3) і (4) в'язкість під час зсуву дорівнює в'язкості в разі течії з розтягом. У загальному випадку $c_2 \leq 1$, а $c_1 \geq 1$.

Рівняння (2) досить добре описує експериментальні дані, отримані внаслідок протікання водного розчину ПЕО молекулярних мас $4 \cdot 10^6$, $6 \cdot 10^6$ і концентрацій 0,007%, 0,0013% відповідно через сопла з діаметром вихідного отвору $0,35 \cdot 10^3$ і $0,6 \cdot 10^3$ м гідроріжучої голівки.

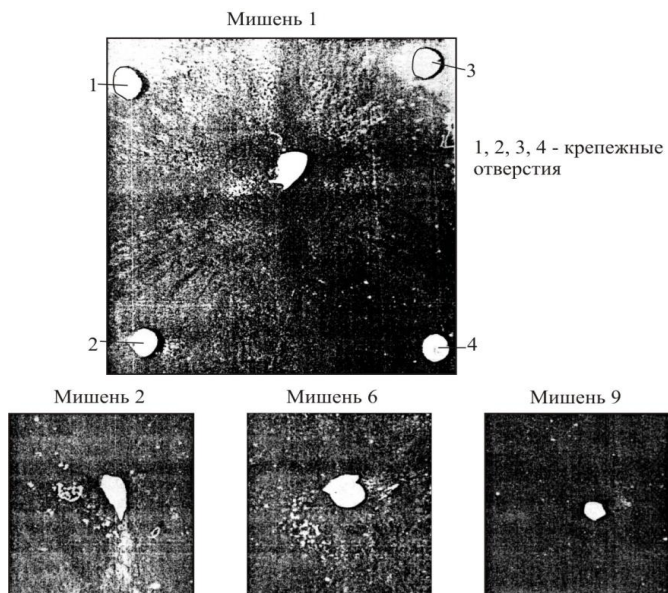
Як вже відзначалося в [10; 11], дослідженням можливості використання полімерів для обробки харчових продуктів різанням, окрім авторів цієї роботи, в Україні і інших країнах не займалися. Є низка робіт, у яких розглядається питання підвищення ефективності різального струменя шляхом уведення в робочу рідину як технологічної добавки полімерів для розрізання нехарчових матеріалів. Передумовою до цього,

як стверджують автори [14], стали результати експериментальних робіт, отримані в 60-ті роки, які свідчили про значне зниження турбулентного тертя опору води внаслідок уведенні в потік малих полімерних домішок, так званий ефект Томса.

Із приводу механізму високої різальної здатності високошвидкісного водополімерного струменя висловлюються суперечливі судження. Одні дослідники вважають, що підвищена різальна здатність водяного струменя з полімерними домішками викликана проявом ефекту Томса під час протіканні робочої рідини через сопло ріжучої голівки [14]. Виходячи з цього, стверджується, що струмінь з домішками полімеру має більшу швидкість і динамічний тиск, ніж струмінь чистої води, за однакового робочого тиску і діаметрі сопла, а отже, інтенсивніше руйнує матеріал. У інших роботах передбачається, що у водополімерному струмені утворюються (без експериментального доказу) асоціати молекул полімеру і розчинника [15]. У наших роботах [4; 16–18] аномально висока різальна здатність високошвидкісного водополімерного струменя зв'язується з деформаційними ефектами, що проявляються під час течії водних розчинів ПЕО з розтягом. Нижче мова піде про досліди, які були поставлені з метою внесення більшої ясності в питання про природу механізму підвищеної різальної здатності водополімерного струменя, в основу якого покладені уявлення про сильну деформаційну дію гідродинамічного поля у вхідній області сопла ріжучої голівки на макромолекулярні клубки ПЕО.

Такий експеримент проведений з використанням імпульсного водомета промислового виготовлення. Опис його гідродинамічної частини, характеристики, методика визначення середньої швидкості, імпульсу й енергії струменя можна знайти в роботі [18]. Для якісного оцінювання енергетичних можливостей струменя в дослідях вивчали взаємодію струменя з перешкодою, встановленою на фізичному маятнику. Перешкода була виготовлена із сталевих (Ст. 3) листів розмірами $(220 \times 220 \times 3) \cdot 10^{-3}$ м із кріпильними отворами $16 \cdot 10^{-3}$ м по кутах. Між площиною перешкоди і тілом фізичного маятника був проміжок $5 \cdot 10^{-2}$ м. Використовували ПЕО молекулярної маси $6 \cdot 10^6$.

Дані дослідів представлені на рис. 3 і в таблиці, звідки видно, що максимальна відстань від водомета до перешкоди, коли ще спостерігається її пробій, складає для води 1,5 м, а для 0,0008%-го водного розчину полімеру 2,5 м; прояв ефективності добавок ПЕО спостерігався з концентрації 0,004%; домішки ПЕО знижують середню швидкість струменя.



Мишеньі: 1, 2 – вода; 6 – $M_{\text{ПЭО}} = 6 \cdot 10^6$, $C_{\text{ПЭО}} = 0,0004\%$;

9 – $M_{\text{ПЭО}} = 6 \cdot 10^6$, $C_{\text{ПЭО}} = 0,0008\%$

Рис. 3. Фотографії перешкод-мішеней після взаємодії з високошвидкісними струменями води та водного розчину ПЕО

Отримані експериментальні дані цілком пояснюються з точки зору сильної деформаційної дії гідродинамічного поля на молекулярні клубки ПЕО, розглянутої вище. Водополімерний струмінь, що виходить з сопла, виявляється «армованим» сильно розгорнутими макромолекулярними ланцюгами ПЕО і динамічними структурами. Частина енергії йде на структурну перебудову потоку [4; 18], що і обумовлює зниження середньої швидкості струменя водного розчину ПЕО і при цьому покращується якість її формування – струмінь з добавками ПЕО компактніший, ніж водяний. Останнє сприяє збільшенню граничної відстані, з якої ще відбувається пробій перешкоди-мішені. Те, що добавки ПЕО збільшують компактність високошвидкісного струменя, видно з порівняння діаметрів отворів у мішенях 1 і 9 (рис. 3 і табл.).

Таблиця

Вплив концентрації ПЕО у водному розчині і відстані від зрізу сопла до перешкоди на характер взаємодії з нею струменя полімерного розчину

Номер досліджу (мішені)	$C_{\text{ПЕО}}, \%$	Відстань маятника (мішені), м	Середня швидкість струменя, м/с	Характер пробою перешкоди-мішені
11	0	0,5	255	Діаметр отвору $(18-20) \cdot 10^{-3}$ м, краї рвані
22	0	1,5	255	Діаметр отвору $(15-18) \cdot 10^{-3}$ м, краї рвані
33	0	1,75	250	Немає пробою
44	0	2,0	250	Немає пробою
55	0	2,5	250	Немає пробою
66	0,0004	1,5	240	Діаметр отвору $(15-18) \cdot 10^{-3}$ м, краї рвані
77	0,0004	1,75	240	Прогин із розривом $(3 \times 10) \cdot 10^{-3}$ м
88	0,0004	2	235	Немає пробою
99	0,0008	2,5	230	Діаметр отвору $(8-10) \cdot 10^{-3}$ м, краї рівні

З'ясувавши динаміку макромолекул у гідродинамічному полі гідроріжучої голівки [4; 8] і експериментально довівши наявність динамічного структуроутворення у вхідній області сопла, можна вирішити питання про природу аномально високої різальної здатності високошвидкісного водополімерного струменя і отримати обґрунтовані уявлення про процес гідроструминної водополімерної обробки харчових продуктів.

Порівняння концентраційної залежності різальної здатності струменя водного розчину ПЕО [10; 11] і даних, що свідчать про утворення динамічних надмолекулярних структур у водних розчинах

ПЕО, дозволяють стверджувати, що в околиці оптимальної концентрації ПЕО ($C_{\text{ПЕО}} \geq C_{\text{опт}}$), коли різальна здатність водополімерного струменя досягає максимуму, у розчинах починають генеруватися анізотропні надмолекулярні утворення, що мають час життя в 10 разів більше θ_c [18]. Подальше підвищення концентрації ПЕО у водному розчині призводить до того, що створюються умови для взаємодії між окремими молекулами ПЕО навіть без дії на них гідродинамічного поля. Це призводить до різкого зростання звичайної в'язкості і, відповідно, до зниження швидкості струменя водного розчину ПЕО. Наслідком цього є зменшення різальної здатності водополімерного струменя досягши високої концентрації ПЕО у водному розчині. Було отримано, що оптимальне значення концентрації ПЕО у водному розчині задовольняє критерію концентрованості розчинів за Дебаєм – $C_{\text{опт}} \cdot [\eta]_0 \leq 1$.

Таким чином, молекулярно-надмолекулярний механізм аномально високої різальної здатності високошвидкісного струменя водного розчину ПЕО полягає у виникненні автоколивального режиму оборотних процесів розгортання молекул ПЕО під дією квазірегулярно виникаючих подовжніх градієнтів швидкості у вхідній області сопла і впливі ланцюгів ПЕО, що розгортаються як на молекулярному, так і на надмолекулярному рівнях, на структуру гідродинамічного поля, тобто в результаті осциляцій деформації макромолекул ПЕО і динамічних надмолекулярних структур, виникає «армування» струменя водного розчину, що виходить із сопла, сильно розгорнутими ланцюгами ПЕО і надмолекулярними структурами. Частина енергії струменя йде на структурну перебудову потоку, що і обумовлює зниження її середньої швидкості і збільшення його компактності. Останнє сприяє, незважаючи на деяке зниження швидкості струменя, збільшенню різальної здатності водополімерного струменя і граничної відстані, з якої ще відбувається розрізання харчового продукту.

Розроблений підхід до природи виникнення аномально високої різальної здатності струменя водного розчину ПЕО добре укладається в загальну схему саморегульованих процесів, в яких домінують негативні зворотні зв'язки, що характерно для систем, здатних змінювати свої властивості під дією течії з розтягом, яка реалізується у вхідній області сопла гідроріжучої голівки.

Висновки. Експериментально довівши наявність динамічного структуроутворення у вхідній області сопла, що формує струмись і враховуючи динаміку макромолекул в гідродинамічному полі сопла, вирішено питання про природу аномально високої різальної здатності

водополімерного струменя і обґрунтовано уявлення про процес гідрострумнинної водополімерної обробки харчових продуктів.

Отриманий узагальнений закон протікання водних розчинів ПЕО через сопло гідроріжучої голівки добре описує експериментальні дані і може бути використаний при проектних опрацюваннях конструктивних особливостей гідроріжучого устаткування.

Встановлені закономірності процесу гідрострумнинної водополімерної обробки харчових продуктів різанням і взаємозв'язку окремих явищ, що відбуваються при цьому, мають важливе значення для обґрунтування схем розрахунку основних технологічних параметрів і режимів роботи устаткування для гідрострумнинної водополімерної обробки харчових продуктів.

Список джерел інформації / References

1. Brectkin, Yu.V., Agranova, S.A., Diakonova, N.E., Pogrebnyak, V.G. (1989) "The effects of birefringence of polymer solutions in a strong longitudinal hydrodynamic field", *Polymer Science, B*, Vol. 3, No 11. pp. 844-846.
2. Keller, A., Odell, J.A. (1985) "The extensibility of macromolecules in solutions, a new focus for macromolecular science", *Colloid. Polym. Sci.*, Vol. 263, No 3, pp. 181-201.
3. Odell, J.A., Keller, A., Miles, M.J. (1985) "Assessment of molecular connectedness in semi-dilute polymer solutions by elongational flow", *Polymer*, Vol. 26, No 8. pp. 1219-1226.
4. Pogrebnyak, A.V., Ivanyuta, Yu.F. (2015) "Structure formation in polyethyleneoxide solution streaming through jet-shaping head while cutting foodstuffs", *Scientific journal NRU ITMO Series: Processes and equipment for food production*, No 1(23), pp.138-141.
5. Deynichenko, G.V., Pogrebnyak, A.V., Ivanyuta, Yu.F. (2015) "The nature of increased cutting ability of a polyethylene oxide solution jet while processing food products", *Scientific journal NRU ITMO Series: Processes and equipment for food production*, No 3(25), pp.6-13.
6. Nicolis, G., Prigogine, I. I. (1977) *Self-organization in nonequilibrium systems: from dissipative structures to order through fluctuations*, New York, London, Sydney, Toronto, 400 p.
7. Френкель С. Я. Концентрированные растворы полимеров / С. Я. Френкель, Г. К. Ельяшевич, Ю. Н. Панов // Успехи химии и физики полимеров. – М. : Химия, 1970. – С. 87–138.
Frenkel, S.Ya., Eliashevich, G.K., Panov, Yu.N. (1970) "Concentrated solutions of polymers", *Uspekhi khimii i fiziki polimerov*, ["Koncentrirovanye rastvory polimerov"], Chemistry, Moscow, pp. 87-138.
8. Pogrebnyak, A.V., Ivanyuta, Yu.F. (2014) "Peculiarities of polyethyleneoxide solution streaming through jet-shaping head while cutting foodstuffs", *Obkladnannia ta tekhnolohii kharchovykh vyrobnytstv* : subj. scien. Bull., DonNUET, Donetsk, Is. 32, pp. 50-59.

9. Ельяшевич Г. К. Термодинамика ориентации растворов и расплавов полимеров / Г. К. Ельяшевич, С. Я. Френкель // Ориентационные явления в растворах и расплавах полимеров. – М. : Химия, 1980. – С. 9–90.

Eliashovich, G.K., Frenkel, S.Ya. (1980) “Thermodynamics of the orientation of polymer solutions and melts”, *Orientacionnye yavleniya v rastvorovakh i rasplavakh polimerov*, [“Termodinamika orientaciyi rastvorov i rasplavov polimerov”], Chemistry, Moscow, pp. 9-90.

10. Дейниченко Г. В. Гідроструминне водополімерне розрізання заморожених харчових продуктів / Г. В. Дейниченко, А. В. Погребняк // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. праць. – Харків, 2015. – Вип. 1(19). – Т. 1. – С. 94–103.

Deynichenko, G.V., Pogrebnyak, V.G. (2015) “Hydrojet water-polymer cutting of frozen food products”, *Progresywni tekhnika ta tekhnologiyi kharchovyh vyrobnyctv restorannogo gospodarswa i torgivli*, [Gidrostrumynne vodopolimerne rozrizanniya zamorogenykh kharchovykh produktiv], Kharkiv, Is. 1 (19), Vol. 1, pp. 94-103.

11. Pogrebnyak, A.V., Deynichenko, G.V. (2016) “Research of the process of hydrocutting foodstuff”, *Scientific journal NRU ITMO Series: Processes and equipment for food production*, No 3(29), pp. 48-62.

12. Виноградов Г. В. Реология полимеров / Г. В. Виноградов, А. Я. Малкин. – М. : Химия, 1977. – 438 с.

Vinogradov, G.V., Malkin, F.Ya. (1977) *The Rheology of Polymers [Reolodiya polimerov]*, Chemistry, Moscow, 438 p.

13. Повх И. Л. Техническая гидромеханика / И. Л. Повх. – Ленингр. отд-ние : Машиностроение, 1976. – 502 с.

Povkh, I.L. (1976) *Technical of Hydromechanics [Tekhnicheskaia gidromekhanika]*, Leningr. Deposition : Mechanical Engineering, 502 p.

14. Кузьмин Р. А. О преимуществах гидрорезания материалов струей жидкости с добавками водорастворимых полимеров / Р. А. Кузьмин, Р. А. Тихомиров, Д. В. Кравченко // Аэрокосмические технологии и образование на рубеже веков : Материалы Всероссийской научно-технической конференции. – Рыбинск : РГАТА, 2002. – Ч. 2. – С. 53–54.

Kuz'min, R.A., Tikhomirov, R.A., Kravchenko, D.V. (2002) “On the advantages of water jet cutting with liquid water jet with additives of water-soluble polymers”, *Aerokosmicheskiye tekhnologiyi i obrazovaniye na rubeje vekov* [“O preimushchestvakh gidrorezaniya materialov struey jidkosti s dobavkami polimerov”], RGATA, Rybinsk, Part 2, pp. 53-54.

15. Кудин А. М. О размерах ассоциатов в растворах полимеров, снижающих гидродинамическое сопротивление / А. М. Кудин // Гидромеханика. Респ. межвед. техн. сб. – Киев : Наук. Думка, 1972. – Вип. 20. – С. 82–87.

Kudin, A. M. “On the sizes of associates in solutions of polymers that reduce the hydrodynamic resistance” *Hydromekhanika* [“O razmerakh associatov v rastvorakh polimerov, snijaushchikh gidrodinamicheskoe soprotivlenie”], Science. Dumka, Kiev, Is. 20, pp. 82-87.

16. Погребняк А. В. Механизм повышенной разрушающей способности высокоскоростной струи раствора полимера / А. В. Погребняк // Реология и физико-химическая механика гетерофазных систем. – МГУ им. М.В. Ломоносова. – М., 2009. – С. 167–168.

Pogrebnyak, A. V. (2009) “The mechanism of increased cutting ability of a polymer solution high-speed jet”, *Rheologiya i fiziko-khimicheskaya mekhanika geterofaznykh sistem* [“Mehanizm povyshenoy razrushayushchey sposobnosti vysokoskorostnoy strui rastvora polimera”], Moscow, pp.167-168.

17. Погребняк А. В. Природа увеличения режущей способности водополимерной струи при обработке пищевых продуктов / А. В. Погребняк // Материалы 27 Международного Симпозиума по Релогии. – Ин-т нафтехим. синтеза им. А. В. Топчиева РАН, МГУ им. М. В. Ломоносова. – М., 2014. – С.151–152.

Pogrebnyak, A.V. (2014) “The nature of increased cutting ability of a polymer solution jet while processing food products”, *27th Symposium on Rheology* [“Priroda uvelicheniya rejushchey sposobnosti strui pri obrabotke pishchevykh produktov”], RAN, MGU, Moscow, pp.151-152.

18. Погребняк А. В. Высокоэффективное гидрорезание твердых пищевых продуктов и материалов / А. В. Погребняк // Управление реологическими свойствами пищевых продуктов. – Московский гос. ун-т пищ. производств. – М., 2008. – С. 173–179.

Pogrebnyak, A.V. (2008) “High and effective hydraulic cutting hard food products and materials”, *Upravleniye relogicheskimi svoystvami pishchevykh produktov* [“Vysokoeffektivnoye gidrorezaniye tverdykh pishchevykh produktov i materialov”], MGUPP, Moscow, pp.173-179.

Дейниченко Григорій Вікторович, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри устаткування харчової і готельної індустрії ім. М.І. Беляєва, факультет обладнання та технічного сервісу, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Клочківська, 333, м. Харків, Україна, 61051. Тел.: (057)349-45-56; e-mail: DeynichenkoGV@rambler.ru.

Дейниченко Григорий Викторович, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой оборудования пищевой и гостиничной индустрии им. М.И. Беляева, факультет оборудования и технического сервиса, Харьковский государственный университет питания и торговли. Адрес: ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051. Тел.: (057)349-45-56; e-mail: DeynichenkoGV@rambler.ru.

Deynichenko Grygoriy, Dr. Sci. (Tech.), Prof., Kharkiv State University of Food Technology and Trade. Address: Klochkivska str., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051. Tel. (057)349-45-56; e-mail: DeynichenkoGV@rambler.ru.

Погребняк Андрій Володимирович, канд. техн. наук, доц., докторант кафедри устаткування харчової і готельної індустрії ім. М.І. Беляєва, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Клочківська, 333, м. Харків, Україна, 61051. Тел.: (057)349-45-56; e-mail: Pogrebnyak.AV@mail.ru.

Погребняк Андрей Владимирович, канд. техн. наук, доц., докторант кафедры оборудования пищевой и гостиничной индустрии им. М.И. Беляева, Харьковский государственный университет питания и торговли. Адрес: ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051. Тел.: (057)349-45-56; e-mail: Pogrebnyak.AV@mail.ru.

Pogrebnyak Andriy, PhD, Assoc. Prof., Kharkiv State University of Food Technology and Trade. Address: Klochkivska str., 333, Kharkiv, Ukraine, 61051. Tel. (057)349-45-56; e-mail: Pogrebnyak.AV@mail.ru.

*Рекомендовано до публікації д-ром техн. наук, проф. М.І. Погожих.
Отримано 15.04.2017. ХДУХТ, Харків.*

УДК 53.043:664

АНАЛИЗ ПРОЦЕССУ ИНДУКОВАННОГО ТЕПЛОМАСООБМІНУ МЕТОДОМ ФАЗОВОГО ПРОСТОРУ

М.І. Погожих, А.О. Пак, А.В. Пак, М.В. Жеребкін

Обґрунтовано аналіз процесу тепломасообміну в термостаті методом фазового простору як одного із способів якісного аналізу стану системи. Побудовано фазовий портрет тепломасообміну в термостаті для можливих характерних шляхів еволюції системи. На фазовому портреті ідентифіковано особливі точки. Описано та проілюстровано характерні шляхи еволюції системи між нестійким станом рівноваги та стійким. Відзначено особливості фазових траєкторій тепломасообміну в термостаті за умови реалізації індукованого тепломасообміну.

Ключові слова: індукований тепломасообмін, метод фазового простору, узагальнена координата.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ИНДУЦИРОВАННОГО ТЕПЛОМАССООБМЕНА МЕТОДОМ ФАЗОВОГО ПРОСТРАНСТВА

Н.И. Погожих, А.О. Пак, А.В. Пак, М.В. Жеребкин

Обоснован анализ процесса тепломасообмена в термостате методом фазового пространства как одного из способов анализа состояния системы. Построен фазовый портрет тепломасообмена в термостате для возможных характерных путей эволюции системы. На фазовом портрете