

ГІДРОСТРУМІННЕ ВОДОПОЛІМЕРНЕ РОЗРІЗАННЯ ЗАМОРОЖЕНИХ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

Г.В. Дейниченко, А.В. Погребняк

Експериментально доведено, що використання як робочої рідини водних розчинів поліетиленоксиду під час розрізання заморожених харчових продуктів суттєво підвищує ефективність процесу гідрорізання та якість поверхні розрізу.

Отримані закономірності поведінки макромолекул за умови течії з позовежнім градієнтом швидкості й ефекти пружних деформацій, що проявляються при цьому, мають визначальне значення в розумінні механізму аномально високої ріжучої здатності водополімерного струменя.

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

ГИДРОСТРУЙНОЕ ВОДОПОЛИМЕРНОЕ РАЗРЕЗАНИЕ ЗАМОРОЖЕННЫХ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Г.В. Дейниченко, А.В. Погребняк

Експериментально доказано, что использование в качестве рабочей жидкости водных растворов полиэтиленоксида при разрезании замороженных пищевых продуктов существенно повышает эффективность процесса гидрорезания и качество поверхности разреза.

Полученные закономерности поведения макромолекул при течении с продольным градиентом скорости и проявляющиеся при этом эффекты упругих деформаций имеют определяющее значение в понимании механизма аномально высокой режущей способности водополимерной струи.

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

USING WATER-POLYMER JET CUTTING OF FROZEN FOOD PRODUCTS

G. Deynichenko, A. Pogrebnyak

Complex studying of the process of hydro-cutting of frozen food products is carried out. It has given the chance to offer the most expedient ways for the

intensification of the process of hydro-cutting of frozen food products. It is experimentally proved that using polyethyleneoxide water solutions as a working liquid while cutting frozen food products substantially increases efficiency of hydro-cutting process and quality of the cut surface.

The study of polyethyleneoxide concentration effect on cutting performance of food products frozen to -25°C and to the temperature of liquid nitrogen ($-195,8^{\circ}\text{C}$) with hydro-polymer jet having outflow pressure of 100 MPa and a nozzle diameter of 0,35.10-3 m showed that cutting speed grew with the increasing concentration of polyethyleneoxide in water and reached its maximum at some optimal value. The optimal concentration equaled 0,007% for polyethyleneoxide molecular weight 4.106. The experiments gave an increase of high speed water jet cutting ability due to polyethyleneoxide additives to it by the order of magnitude while cutting meat frozen to -25°C and by 5 times for meat frozen to $-195,8^{\circ}\text{C}$.

Three-level scale of quality estimation for a cut surface in food products is offered: "fragmentary", "even qualitative" and "high-quality" cuts where quantitative criteria are connected with the roughness and undulation of cut surface in frozen food products.

In converging polymer solution flow macromolecules are forced by a hydrodynamic field to rather strong stretching that causes the field restructuring. The determined regularities of macromolecules behavior in the flow with longitudinal velocity gradient 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 processing of foodstuffs by cutting.

Understanding the nature of the increased cutting power of water-polymer jet will make it possible to develop recommendations for 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. Під час гідрорізання харчових продуктів як ріжучий орган використовується високошвидкісний тонкий струмінь рідини. Від властивостей робочої рідини залежить безпека, ефективність і екологічність процесу гідрорізання. Для цього робоча рідина повинна мати наступні властивості: не бути вибухонебезпечною, не впливати негативно на здоров'я персоналу і якість харчового продукту, який розрізається, не викликати корозію металевих частин устаткування й сприяти одержанню необхідних гідродинамічних характеристик високошвидкісного струменя малого діаметру, що забезпечують максимальну продуктивність і найкращу якість поверхні розрізу з найменшими енерговитратами на формування струменя. Мінімізація енергетичних витрат, насамперед, повинна забезпечуватися за рахунок зниження робочого тиску рідини перед соплом до якомога низького

його значення зі збереженням технологічних вимог до харчового продукту, що розрізається. Тому вибір типу й складу робочої рідини є одним із основних завдань, які необхідно вирішувати під час розробки технологічного процесу гідрорізання харчових продуктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Гідрорізання заморожених харчових продуктів є складним процесом зі своїми специфічними особливостями. На сьогоднішній день цей процес повністю не вивчений і не систематизований, в основному через його складність [1–6].

Процес гідрорізання відрізняється від традиційних механічних методів розрізання продуктів харчування тим, що в якості ріжучого інструмента використовується тонкий високошвидкісний струмінь рідини. Рух струменя в повітрі за тиску витікання понад 100 МПа відбувається з близькою до звукової швидкістю. Вплив струменя (як зовнішнього навантаження) з такою швидкістю на заморожений харчовий продукт під час гідрорізання необхідно розглядати як ударну дію. Слід враховувати також і те, що в момент удару струменя по харчовому продукту за температури -5°C і нижче, до температури кипіння рідкого азоту $-195,8^{\circ}\text{C}$, раптова зміна його швидкості викликає значне зростання тиску струменя, що приводить до різкої зміни швидкості в будь-якій точці деформованого рідинного потоку. Підчас впливу таких тисків у харчовому продукті, що розрізається, напруги швидко зростають до критичних, а опір розриву виникає нижче межі його текучості. Останнє приводить до руйнування харчового продукту [1; 6].

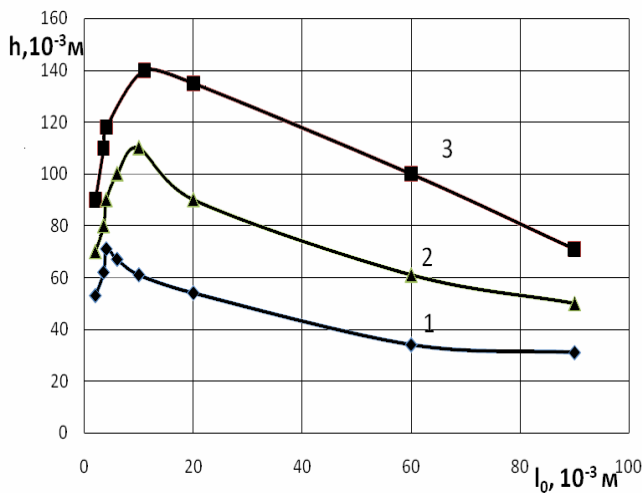
Метою статті є експериментальне підтвердження суттєвої інтенсифікації процесу гідрорізання та покращення якості поверхні розрізів за умови використання водних розчинів полімеру як робочої рідини для розрізання заморожених харчових продуктів.

Виклад основного матеріалу дослідження. До вирішення завдання підвищення ефективності процесу гідрорізання можна підійти, використав для цього спостережувані аномалії за ламінарної подовжньої течії розчинів полімерів у їх гідродинамічній й механохімічній поведінці [1–5], тобто в якості робочої рідини використати водні розчини полімерів. Полімер повинен бути безпечною речовиною, яку дозволено для використання в харчовій промисловості. Таким полімером може бути поліетиленоксид (ПЕО), що має клас безпеки 4 (безпечна речовина) і використовується в харчовій промисловості як загусник та ін. [7].

У працях [2–4] було вирішене питання про фізичну поведінку макромолекул в умовах струменеформуючої голівки і з'ясована

природа генерованих під дією поздовжнього гідродинамічного поля в розчинах полімерів структурних утворень із досить великим часом їх життя. Серед найцікавіших і практично важливих результатів цих досліджень є доказ того, що виникнення аномального дисипативного режиму течії розчинів полімерів під час витікання їх з струменеформуючих голівок – сопел обумовлено реалізацією високих ступенів (аж до 60%) розгорнення полімерних ланцюгів. Тому можна сподіватися на підвищення ефективності процесу гідрорізання, якщо, водяний струмінь, що розрізає заморожений харчовий продукт, замінити на водополімерний.

На рис. 1 наведено залежність глибини різу в м'ясі, що має температуру -25°C , від відстані між його поверхнею і зрізом сопла за різних концентрацій ПЕО у воді. Видно, що глибина різу в м'ясі досить різко зростає зі збільшенням концентрації ПЕО у воді і досягає максимуму за деякої оптимальної величини. Для ПЕО молекулярної маси $4 \cdot 10^6$ оптимальна концентрація виявилася рівною 0,007%.



$t = -25^{\circ}\text{C}$; $\Delta P_0 = 100\text{ МПа}$; $d_0 = 0,35 \cdot 10^{-3}\text{ м}$;

1 – вода; 2 – 0,03%; 3 – 0,007%

Рис.1. Залежність глибини різу в замороженому м'ясі від відстані між його поверхнею і зрізом сопла за різних концентрацій ПЕО у воді

У таблиці наведено ширину різку (b) в замороженому м'ясі за температури -25°C залежно від відстані (l_0) між поверхнею м'яса і зрізом сопла.

Таблиця

Вплив відстані між поверхнею м'яса і зрізом сопла на ширину різку водополімерним і водяним струменями
($C_{\text{ПЕО}}=0,007\%$; $\Delta P_0=100\text{ МПа}$; $d_0=0,35\cdot 10^{-3}\text{ м}$)

Робоча рідина	Ширина різку b для різних $l_0, \cdot 10^{-3}\text{ м}$				
	10	20	40	60	90
Водний розчин ПЕО	0,36	0,37	0,39	0,41	0,45
Вода	0,45	0,50	0,57	0,62	0,77

Дані таблиці свідчать, що водополімерний струмінь має кращі, ніж водяний струмінь гідродинамічні характеристики, що забезпечують високу продуктивність за умови високої якості поверхні розрізу в м'ясі.

Так, наприклад, якщо струмінь води із заданою продуктивністю забезпечує високоякісний розріз у замороженому м'ясі за $l_0=l_{\text{опт}}$, то струмінь водного розчину ПЕО дозволяє одержати зі збереженням продуктивності ту ж глибину розрізу й таку ж якість поверхні розрізу на відстані до 0,09 м. Це дає можливість різати не тільки товстіші шматки харчового продукту, але й розрізати шматки, конфігурація яких не дозволяє підвести їхні поверхні безпосередньо до струменеформуючої голівки або одержувати необхідні технологічні параметри за значно менших тисків.

Дослідження впливу концентрації ПЕО на продуктивність різання замороженого м'яса за -25°C водополімерним струменем з тиском витікання 100 МПа і діаметром сопла $0,35\cdot 10^{-3}\text{ м}$ показало, що раціональна швидкість різку значно зростає зі збільшенням концентрації ПЕО у воді й досягає максимуму за деякої оптимальної величині $C_{\text{ПЕО}}$. Експериментально було отримане значення (яке виходить за межі можливості гідроустановки) підвищення раціональної швидкості переміщення гідроструменя відносно зразка харчового продукту під час його розрізання за рахунок добавок у воду ПЕО з молекулярною масою $4\cdot 10^6$.

Отримані експериментальні дані цілком пояснюються сильним деформаційним впливом гідродинамічного поля на молекулярні клубки. Відомо [5], що деформація молекулярного клубка у поздовжньому гідродинамічному полі буде значно сильніша, ніж у зсувному, тому що під час поздовжньої течії виникає позитивний зворотній зв'язок між розмірами молекули, що збільшуються в результаті деформації, й градієнтом швидкості, і процес розгортання починається з відносно низьких критичних градієнтів швидкості, лавиноподібно наростаючи. У зсувному гідродинамічному полі виникає негативний, а не позитивний, як у випадку поздовжнього поля, зворотній зв'язок між розмірами молекули й градієнтом швидкості і, природно, значна деформація молекулярних клубків утруднена.

Якщо обчислити поздовжній градієнт швидкості, який реалізується у вхідній області сопла струменеформуючої голівки, то виявляється, що він не перевищує (у наших експериментах) $2 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$, незважаючи на надто високі (до звукові) швидкості і, отже, значно більші поперечні, ніж поздовжні, градієнти швидкості. Це вказує на те, що під час витікання полімерного розчину через сопло струменеформуючої голівки макромолекули, як і у випадку короткого капіляра [1; 5], насамперед піддаються сильному деформаційному впливу поздовжнього гідродинамічного поля. Реалізовані при цьому градієнти швидкості вище критичних $\dot{\epsilon}_{\text{кр}}$, пов'язаних із часом

релаксації макромолекул співвідношенням $\theta_c = \frac{0,5}{\dot{\epsilon}_{\text{кр}}}$ (де $\dot{\epsilon}_{\text{кр}}$ –

градієнт швидкості, за якого макромолекула втрачає стійкість) [8], достатні для розгортання макромолекул. Тому водополімерний струмінь, який виходить із сопла, виявляється «армований» сильно розгорнутими макромолекулярними ланцюгами. Частина енергії струменя йде на структурну перебудову потоку, що й обумовлює зниження середньої швидкості потоку і збільшення компактності водяного струменя з полімерними добавками [1]. Останнє сприяє збільшенню глибини різку в замороженому харчовому продукті.

Те, що полімерні добавки збільшують компактність високошвидкісного струменя, видно з порівняльного аналізу фотографій водяного і водополімерного струменів, наведених на рис. 2 [4].

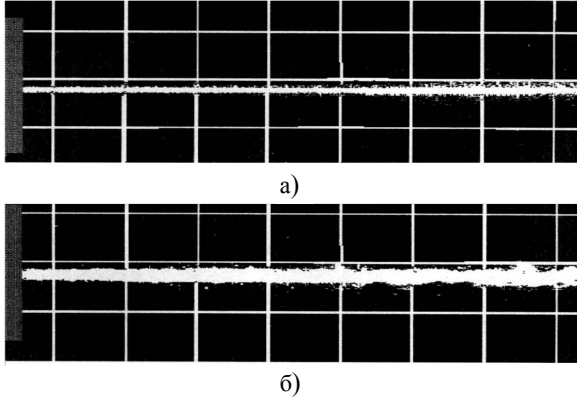


Рис. 2. Фотографії струменів водного розчину ПЕО і води, які витікають із сопла: а – розчин ПЕО; $M_{\text{ПЕО}}=4 \cdot 10^6$; $C_{\text{ПЕО}}=0,01\%$; б – вода

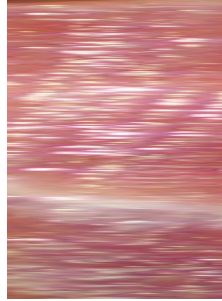
Можна стверджувати, що розглянуті результати експериментів і дані дослідження [1] свідчать про визначальну роль реалізованого під час течії поздовжнього градієнта швидкості в деформуванні молекулярних клубків і незначну роль поперечного градієнта швидкості. Цей факт є однією з основних умов, які необхідно враховувати під час розрахунку конструктивних елементів (особливо конфігурації соплової голівки або змішувача у випадку подачі полімеру безпосередньо у водяний струмінь) і гідродинамічних режимів гідроріжучого устаткування, якщо використовувати в якості ріжучого струменя водний розчин полімеру.

У наших експериментах було зроблено оцінку якості поверхні гідророзрізів у замороженому м'ясі. Оцінка якості поверхні розрізів у заморожених харчових продуктах проводилася візуально і за допомогою аналізу профілограм, тобто з використанням щупового методу виміру параметрів шорсткості і хвилястості [6].

Експериментально було встановлено, що якщо швидкість різі є більшою ніж раціональне її значення ($V_{\text{п}} > V_{\text{п,рац}}$), то в процесі гідрорізання замороженого харчового продукту профіль розрізу набуває слабо виражену V-подібну форму, а за дуже низької швидкості різання ($V_{\text{п}} \ll V_{\text{п,рац}}$) має профіль А-подібної форми. Гідрорізання замороженого харчового продукту з раціональною швидкістю або близькою до раціональної приводить до формування розрізу П-подібної форми.



а



б

Рис. 3. Фотографії поверхні розрізу водополімерним (а) і водяним (б) струменями в замороженому свинячому м'ясі

Експеримент також показав (див. рис. 3), що якість поверхні розрізів (відповідно до критеріїв оцінки, які наведено в праці [6]) в замороженому м'ясі значно вища за умови розрізання його водополімерним струменем, ніж в разі розрізання водяним струменем.

Висновки. Добавки ПЕО в робочу рідину – воду інтенсифікують процес гідрорізання, що істотно поліпшує продуктивність, а також якість поверхні розрізів у замороженому харчовому продукті.

Використання розчину ПЕО як робочої рідини вимагає подальшого дослідження процесу взаємодії гідроструменя з замороженими харчовими продуктами та оптимізації параметрів, пов'язаних з конструктивними особливостями струменеформуючої голівки гідроріжучого устаткування та молекулярно-концентраційними характеристиками полімерного розчину.

Список джерел інформації / References

1. 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), “Hight and effective hydraulic cutting hard food products and materials”, *Upravleniye relogicheskimi svoystvami pishchevykh produktov* [“Vysokoeffektivnoe gidrorezanie tverdyh pischevyh produktov i materialov”], Moscow, pp. 173-179.

2. 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*, Sankt Peterburg, No. 1, 5 p.

3. 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, Ин-т нефтехим. синтеза им. А. В. Топчиева РАН. – М., 2009. – С. 167–168.

Pogrebnyak, A.V. (2009), “The mechanism of increased cutting ability of a polymer solution high-speed jet”, *Rheology and the physical and chemical mechanics of heterophase systems* [“Mehanizm povyshenoy razrushaushey sposobnosti vysokoskorostnoy strui rastvora polimera”], MGU, RAN, Moscow, pp. 167-168.

4. Погребняк А. В. Природа увеличения режущей способности водополимерной струи при обработке пищевых продуктов / А. В. Погребняк // Материалы 27 Международного Симпозиума по релогии / Ин-т нефтехим. синтеза им. А. В. Топчиева, 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” [“Priroda uvelichenia reschushey sposobnosti strui pri obrabotke pischevuh produktov”], RAN, MGU, Moscow, pp. 151-152.

5. Pogrebnyak, A.V., Ivanyuta, Yu.F. (2014), “Peculiarities of polyethyleneoxide solution streaming through jet-shaping head while cutting foodstuffs”, *Obladnannia ta tekhnologii kharchovykh vyrobnytstv: subj. scien. Bull.*, DonNUET, Donetsk, Issue. 32, pp. 50-59.

6. Погребняк А. В. Фізичний механізм гідроструменного розрізання харчових продуктів глибокого замороження та якість розрізу / А. В. Погребняк, І. В. Перкун // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. праць / Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. – Х., 2013. – Вип. 1 (17). – Т. 1. – С. 196–202.

Pogrebnyak, A.V., Perkun, I.V. (2013), “The physical mechanism of hydrojet cutting of deeply frozen foodstuff and quality of cut” [“Fizicheskiy mehanizm gidrostrumenevogo rozrizannia harchovykh produktiv i iakist rozrizu”], *Kharkiv, Issue 1 (17), Vol. 1*, pp. 196-202.

7. Encyclopedia of Polymer Science and Technology (1967), ed. by Mark H., John Wiley, New York, Vol. 6, 818 p.

8. Peterlin, A. (1966), “Hydrodynamics of macromolecules in a velocity field with longitudinal gradient”, *J. Polym. Sci. Pt. Polym. Letters*, Vol. 4, No. 4, pp. 287-291.

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

Дейниченко Григорий Викторович, д-р техн. наук, проф., факультет оборудования и технического сервиса, кафедра 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: 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, факультет обладнання та технічного сервісу, кафедра 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, факультет оборудования и технического сервиса, кафедра 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. В.М. Михайловим.
Отримано 1.08.2015. ХДУХТ, Харків.*

УДК 628.161

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНИХ ПРОЦЕСІВ ВОДОПІДГОТОВКИ ТА ВОДООЧИЩЕННЯ

Г.В. Дейниченко, З.О. Мазняк, В.В. Гузенко, В.О. Даниленко

Висвітлено існуючі процеси водопідготовки та водоочищення для харчової промисловості. Подано характеристику різних способів традиційної і мембранної підготовки та очищення води для харчової промисловості. Визначено переваги застосування мембранних процесів водопідготовки та водоочищення в різних галузях харчової промисловості. Запропоновано способи використання мембранних процесів із метою розробки енергозберігаючих технологій водопідготовки та водоочищення.

Ключові слова: вода, процес, мембрана, розділення, очищення, підготовка.

© Дейниченко Г.В., Мазняк З.О., Гузенко В.В., Даниленко В.О., 2015