

УДК 641.512+532.135

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ГИДРОСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ РЕЗАНИЕМ

Погребняк А.В., к.т.н.,

Погребняк В.Г., д.т.н.

*Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа*

Тел.(050)135-15-45

**Аннотация** – закономерности процесса гидрорезания пищевых продуктов исследовали с целью повышения его эффективности и улучшения качества поверхности разрезов путем модификации рабочей жидкости. Экспериментально доказано, что использование в качестве рабочей жидкости водных растворов полиэтиленоксида повышает оптимальное расстояние между поверхностью пищевого продукта и срезом сопла в 15 раз, глубину реза в 4 раза, а также улучшает качество поверхности разреза пищевого продукта.

**Ключевые слова** – пищевые продукты, гидрорезание, глубина реза, ширина реза, полимерный раствор.

*Постановка проблемы.* Гидрорезание используется во многих областях промышленности, поскольку этот метод высоко технологичен в сравнении с традиционными методами резания [1–3]. Несмотря на это в пищевой промышленности он практически не применяется [4]. Основной причиной, по которой метод гидрорезания не применяется в пищевой промышленности, является отсутствие комплексных научных исследований данного процесса [5]. В этой связи, с точки зрения научной новизны, данный метод вызывает значительный интерес.

*Анализ последних исследований.* Опыт применения водяных струй в качестве режущего инструмента для разрезания пищевых продуктов, выявил целый ряд достоинств, присущих waterjet-технологии. В работах [5–7] была доказана практическая целесообразность использования струи воды для разрезания пищевых продуктов. При этом максимальная глубина реза в блоке филе хека, имеющего температуру  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , не превышала  $85 \cdot 10^{-3}$  м при давлении 400 МПа и диаметре сопла  $0,4 \cdot 10^{-3}$  м. При более низких температурах пищевых продуктов, естественно, глубина реза будет еще меньше. Поэтому понижение температуры пищевого продукта до  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже

исключает возможность использования водоструйной резки при давлениях меньше 250÷300 МПа.

Указанные обстоятельства – высокие рабочие давления, а следовательно, высокая стоимость оборудования, малые скорости перемещения водяной струи, не обеспечивающие максимальную производительность с наименьшими энергозатратами на формирование струи [5,7] – стали определяющими в постановке задачи интенсификации процесса гидрорезания пищевых продуктов.

*Формирование целей статьи.* При гидрорезании пищевых продуктов в качестве режущего органа используется высокоскоростная тонкая струя жидкости. От свойств рабочей жидкости зависит способность получения необходимых гидродинамических характеристик гидроструи, обеспечивающих максимальную производительность и наилучшее качество поверхности разреза. Поэтому выбор типа и состава рабочей жидкости является одним из основных вопросов, которые необходимо решать при разработке технологического процесса гидрорезания замороженных пищевых продуктов.

*Основная часть.* В качестве основных критериев оценки эффективности процесса гидрорезания пищевых продуктов нами были приняты – глубина реза  $h$  и скорость приращения боковой поверхности разреза  $S_0$ . Экспериментальное исследование влияния расстояния от среза сопла до поверхности разрезаемого пищевого продукта  $l_0$  на глубину реза  $h$  проводились на образцах мяса свинины при температурах  $-7$  и  $-25$  °С, изменении давления воды  $\Delta P_0$  от 50 до 250 МПа, диаметре сопла  $d_0$   $0,35 \cdot 10^{-3}$  и  $0,6 \cdot 10^{-3}$  м, скорости перемещения гидроструи относительно образца мяса  $V_{п}$  0,015; 0,025; 0,050 и 0,100 м/с. Данные, характеризующие влияние расстояния от среза сопла до поверхности разрезаемого мяса на глубину реза, приведены на рис. 1.

Видно, что зависимость глубины реза  $h$  от расстояния между срезом сопла и поверхностью пищевого продукта  $l_0$  проходит через максимум. Такой характер зависимости  $h$  от  $l_0$  сохраняется для различных условий эксперимента, т.е. для всех исследованных нами давлений воды  $\Delta P_0$ , диаметров сопел  $d_0$  и скоростей перемещения гидроструи относительно образца пищевого продукта  $V_{п}$ .

При относительно малых расстояниях от 0 до некоторого  $l_{опт}$ , увеличение глубины реза с возрастанием расстояния от среза сопла до поверхности пищевого продукта происходит вследствие того, что процесс струеформирования заканчивается не у самого среза сопла, а на некотором расстоянии от него, равном  $l_{опт}$ . При этом расстояние, соответствующее максимальной глубине реза  $h_{max}$ , является с этой точки зрения рациональным. Необходимо иметь ввиду, что уменьшение  $l_0$  относительно  $l_{опт}$ , т.е. относительно рационального значения расстояния от среза сопла до поверхности разрезаемого

пищевого продукта, снижает глубину реза более интенсивно, чем при увеличении  $l_0$  относительно  $l_{\text{опт}}$ .

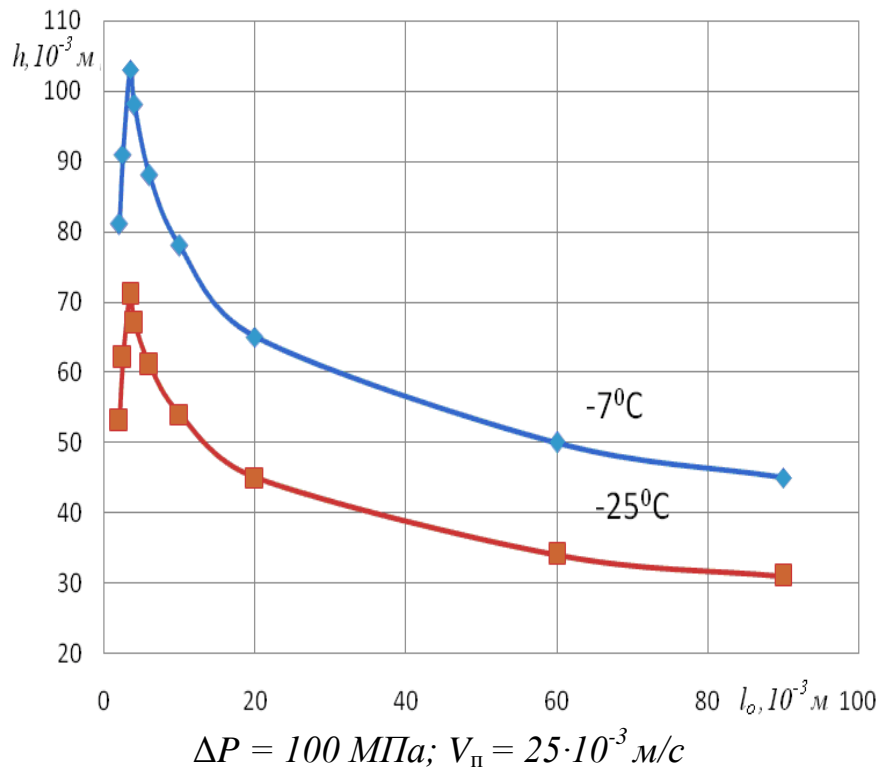


Рис. 1. Зависимость глубины реза от расстояния между срезом сопла диаметра  $0,35 \cdot 10^{-3}$  м и поверхностью мяса разрезаемого струей воды.

Обращает на себя внимание обнаруженная нами независимость величины  $l_{\text{опт}}$  от давления воды перед соплом  $\Delta P_0$  и скорости перемещения гидроструи относительно образца замороженного пищевого продукта  $V_{\text{п}}$ , что свидетельствует о сложном характере истечения воды из сопла, и естественно, изучение одних только интегральных динамических параметров гидроструи недостаточно для понимания наблюдаемых явлений.

Параметрами процесса разрезания пищевого продукта, характеризующими его производительность, являются скорость приращения боковой поверхности разреза  $S_0$ , которая равна произведению  $h$  на  $V_{\text{п}}$ . На рис. 2 представлены результаты экспериментов по влиянию скорости перемещения гидроструи  $V_{\text{п}}$  относительно разрезаемого образца пищевого продукта на скорость приращения боковой поверхности разреза  $S_0$ .

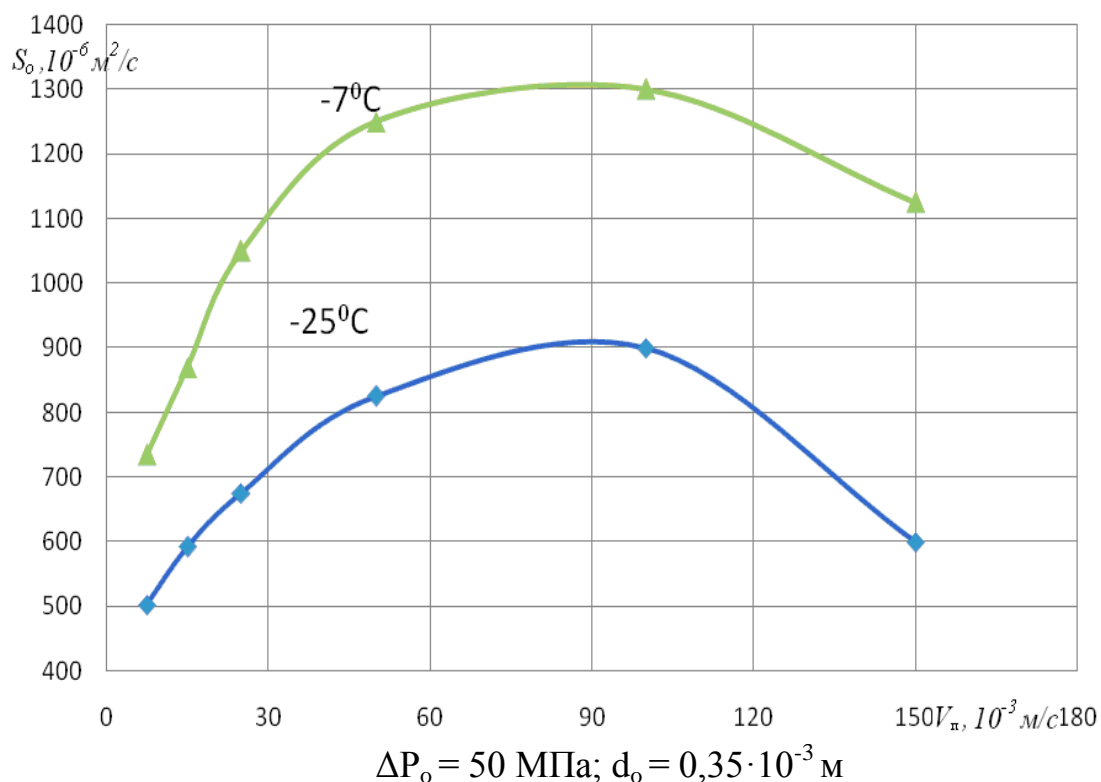


Рис. 2. Залежність швидкості приращення бокової поверхні розріза від швидкості переміщення гідроструї відносно розрізаемого образца мяса при  $l_0 = l_{\text{опт}}$ .

*Гидроабразивное резание.* Одним из методов повышения эффективности процесса гидрорезания является введение в режущую струю жидкости абразивных добавок. В настоящее время ни один из используемых на практике абразивных материалов нельзя применить для гидрорезания пищевых продуктов. В такой ситуации путем повышения эффективности процесса гидрорезания пищевых продуктов может быть применение водоледяного метода, т.е. когда абразивным материалом являются мелкие частицы льда.

Экспериментальная проверка возможности использования водяной струи с частицами льда для разрезания пищевого продукта была выполнена на модельных образцах мяса, в качестве которых использовался кусок льда. Кусок льда имел температуру  $-30^{\circ}\text{C}$ , что соответствует прочности свиного мяса на одноосное сжатие, имеющего температуру  $-25^{\circ}\text{C}$ . Было получено существенное увеличение эффективности процесса за счет использования гидроструи с добавленными в нее частицами льда. Например, если в модельном образце мяса глубина реза чистой водой составила  $0,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , то при использовании льда в качестве абразива при прочих равных условиях получили сквозной разрез образца толщиной  $0,4 \text{ м}$ .

Полученные данные позволяют утверждать, что метод интенсификации процесса гидрорезания замороженного мяса путем

введения в водяную струю мелких частиц льда, высокоэффективен, но использовать его в пищевой промышленности в настоящее время экономически не целесообразно.

Более перспективным с точки зрения эффективности процесса гидрорезания пищевых продуктов может стать гидроабразивный – водосолевой метод, при осуществлении которого в качестве абразива используется поваренная соль. Эксперимент показал, что при водосолевом резании замороженного пищевого продукта, наблюдается существенное увеличение эффективности процесса (таблица 1).

Таблица 1 – Влияние расхода абразива на глубину реза в мясе при температуре  $-25^{\circ}\text{C}$  и давлении 100 МПа

t, °C	Глубина реза $h$ , $10^{-3}$ м			
	абразив	0(вода)	10	20
45	песок	47,6	166	150
	NaCl		122	130
4	песок	55,3	155	153
	NaCl		146	153

Однако использование поваренной соли в качестве абразива осложняется ее растворимостью в воде, и чем выше температура воды, тем выше скорость растворения соли. Понижение температуры водяной струи может значительно снизить скорость растворения поваренной соли, а следовательно, увеличить эффективность водосолевого метода разрезания пищевого продукта.

*Гидрорезание при пониженных температурах струи.* Для реализации процесса гидрорезки при пониженных температурах гидроструи представляют интерес область жидкого состояния воды. Аномальная особенность фазовой диаграммы воды позволяет понижать температуру в ресивере гидрорежущей установки до  $-22,0^{\circ}\text{C}$  при рабочем давлении 207 МПа. Если же давление в ресивере выбрать равным 150 МПа, то из диаграммы состояния воды [8] следует, что для получения температуры водяной струи на выходе из сопла  $-1^{\circ}\text{C}$ , необходимо температуру воды в ресивере понизить до  $-15^{\circ}\text{C}$ . Было получено, что повышение температуры струи воды за счет дросселирования через сопло диаметром  $0,35 \cdot 10^{-3}$  м сжатой до давления 150 МПа, составило  $14^{\circ}\text{C}$ . То есть, охлаждение воды в ресивере до  $-15^{\circ}\text{C}$  при давлении 150 МПа позволяет получить температуру водяной струи на выходе из сопла равную  $-1^{\circ}\text{C}$ . При попадании гидроструи с температурой ниже  $0^{\circ}\text{C}$  в область атмосферного давления, должны генерироваться микрокристаллики льда [7].

Экспериментальное изучение влияния температуры водяной струи на глубину реза проводилось на образцах пищевых продуктов при температуре  $-25^{\circ}\text{C}$ , давлениях воды  $\Delta P_0$  50 и 150 МПа, диаметре сопла  $d_0 = 0,35 \cdot 10^{-3}$  м и скорости перемещения гидроструи относительно образца мяса  $V_{\text{п}} = 25 \cdot 10^{-3}$  м/с. Расстояние от среза сопла до поверхности разрезаемого мяса  $l_0$  было равно  $l_{\text{опт}}$ . Данные, характеризующие влияние температуры водяной струи на глубину реза в образцах мяса с температурой  $-25^{\circ}\text{C}$ , приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Влияние температуры водяной струи на глубину реза в замороженном мясе при  $-25^{\circ}\text{C}$

$\Delta P_0$ , МПа \ / \ $t$ , $^{\circ}\text{C}$	45	4	-0,5	-1
150	124	131	161	более 200
50	27,0	31,2	40,9	94,5

Видно, что глубина реза  $h$  с понижением температуры водяной струи монотонно увеличивается и при  $4^{\circ}\text{C}$  превышает от 6 до 16% глубину реза струей, имеющей температуру  $45^{\circ}\text{C}$ . Такое увеличение  $h$  с понижением температуры водяной струи, прежде всего, обусловлено повышением поверхностного натяжения и вязкости воды, что способствует улучшению ее компактности. Дальнейшее понижение температуры водяной струи до  $-1^{\circ}\text{C}$ , как видно из таблицы 2, приводит к скачкообразному увеличению (на 30 и 50% для давлений 150 и 50 МПа соответственно) глубины реза в пищевом продукте.

Полученный характер изменения глубины реза в пищевом продукте при температуре водяной струи  $-1^{\circ}\text{C}$  является доказательством того, что в водяной струе с момента ее зарождения в воздушной среде происходит генерирование микрочастичек – кристалликов льда, выполняющих такую же роль, как и песок, подаваемый в струю воды.

*Водополимерное резание.* В работах [9,10] был решен вопрос о физическом поведении макромолекул во входной области сопла струеформирующей головки и выяснена природа генерируемых под действием гидродинамического поля в растворах полимеров структурных образований. Поэтому повысить эффективность процесса гидрорезания можно, если режущую пищевой продукт водяную струю заменить на водополимерную. При этом полимер должен быть безопасным веществом и разрешенным для использования в пищевой промышленности. Таким полимером может быть полиэтиленоксид (ПЭО), используемый в пищевой промышленности как загуститель [11].

На рис. 3 приведена зависимость глубины реза в пищевом продукте, имеющем температуру  $-25^{\circ}\text{C}$  от расстояния между его поверхностью и срезом сопла при различных концентрациях ПЭО молекулярной массы  $4 \cdot 10^6$  в воде.

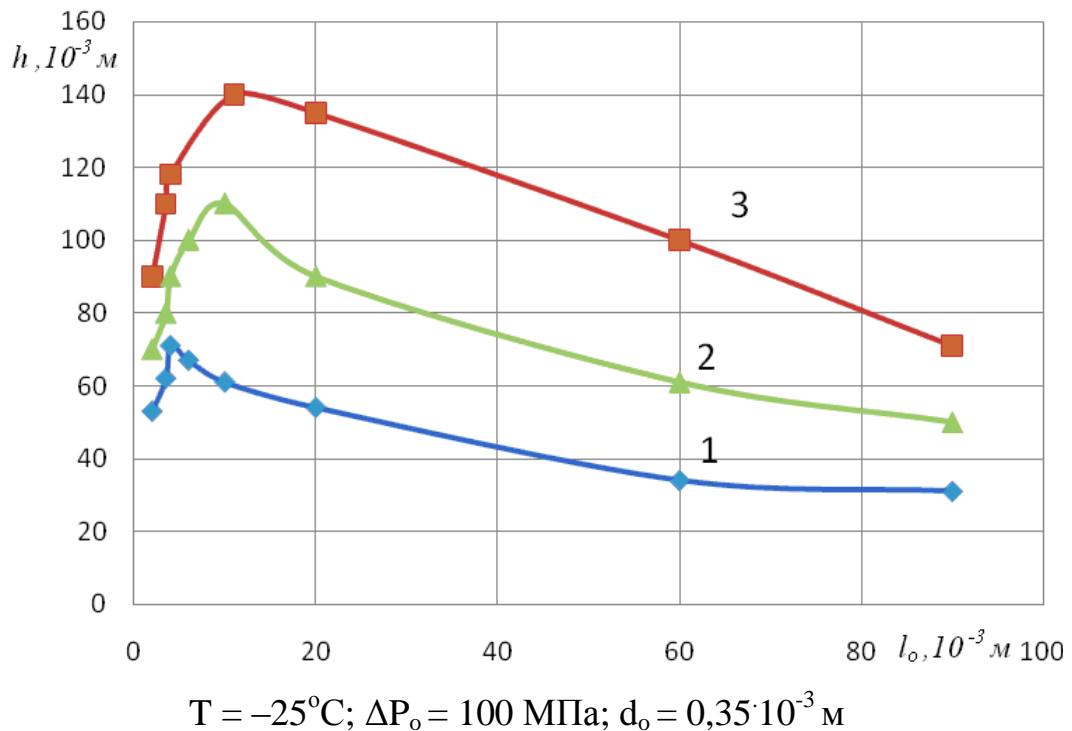


Рис. 3. Зависимость глубины реза в мясе от расстояния между его поверхностью и срезом сопла при различных концентрациях ПЭО в воде: 1 – вода; 2 – 0,003%; 3 – 0,007%.

Видно, что глубина реза в мясе довольно резко возрастает с увеличением концентрации ПЭО в воде и достигает максимума при достижении некоторой оптимальной величины. Для ПЭО молекулярной массы  $6 \cdot 10^6$  оптимальная концентрация равна 0,0013%, а для молекулярной массы  $4 \cdot 10^6$  – 0,007%.

В таблице 3 приведена ширина реза в мясе при температуре  $-25^{\circ}\text{C}$  в зависимости от расстояния между поверхностью пищевого продукта и срезом сопла.

Данные таблицы 3 свидетельствуют о том, что водополимерная струя обладает лучшими, чем водяная струя гидродинамическими свойствами. Например, если струя воды с заданной производительностью обеспечивает высококачественный разрез в мясе при  $l_0 = l_{\text{опт}}$ , то струя водного раствора ПЭО позволяет получить при сохранении качества поверхности реза ту же глубину разреза при  $l_{\text{опт}} = 0,09 \text{ м}$ , т.е. оптимальное расстояние повышается в 15 раз.

Таблица 3 – Влияние  $l_0$  на ширину реза водополимерной и водяной струями в замороженном мясе ( $C_{\text{пэо}} = 0,007\%$ ;  $\Delta P_0 = 100$  МПа;  $d_0 = 0,35 \cdot 10^{-3}$  м)

Ширина реза $b$ для разных $l_0$					
$l_0, \cdot 10^{-3}$ м	10	20	40	60	90
Рабочая жидкость					
водный раствор ПЭО	0,36	0,37	0,39	0,41	0,45
вода	0,45	0,50	0,57	0,62	0,77

Исследование влияния концентрации ПЭО на производительность резания замороженных пищевых продуктов при  $-25^\circ\text{C}$  водополимерной струей с давлением истечения 100 МПа и диаметром сопла  $0,35 \cdot 10^{-3}$  м показало, что рациональная скорость реза значительно возрастает с увеличением концентрации ПЭО в воде и достигает максимума при оптимальной величине  $C_{\text{пэо}}$ . Экспериментально было получено значительное (выходящее за пределы возможности установки) повышение рациональной скорости перемещения гидроструи относительно образца пищевого продукта, имеющего температуру  $-25^\circ\text{C}$  при его резе за счет добавок в воду ПЭО молекулярной массы  $6 \cdot 10^6$ .

Полученные экспериментальные данные вполне объясняются с точки зрения сильного деформационного воздействия гидродинамического поля на молекулярные клубки. С позиции термодинамики и физической кинетики опыты, поставленные нами, согласуются с теорией диссипативных структур и бифуркаций Пригожина. Макромолекулы в струеформирующей головке гидрорежущей установки подвергаются сильному деформационному воздействию продольного гидродинамического поля и поэтому выходящая гидроструя оказывается «армированной» развернутыми макромолекулярными цепями [6,9,10]. Часть энергии струи идет на структурную перестройку потока, что и обуславливает снижение ее средней скорости [6] и увеличение компактности водополимерной струи (см. таблицу 3). Последнее способствует увеличению глубины реза в пищевом продукте. К увеличению режущей способности водополимерной струи приводит и динамическое структурообразование, наблюдаемое при сходящемся течении (в струеформирующей головке) водных растворов полимеров [10].



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



Рис. 4. Фотографии поверхностей разреза струями в замороженном свином мясе: а – водополимерной струей; б – водяной струей.

Оценка качества боковых поверхностей разрезов замороженных пищевых продуктов производилась визуально и с помощью анализа профилограмм. Эксперимент показал (рисунок 4), что качество поверхности разрезов в замороженном пищевом продукте при его разрезании водополимерной струей существенно выше, чем при разрезании водяной и водоабразивными струями.

*Выводы.* Показана перспективность технологии гидрорезания, особенно для резки пищевых продуктов, замороженных до  $-25^{\circ}\text{C}$  и ниже. Предложены водосолевой, водоледяной, а также водополимерный способы интенсификации процесса гидрорезания замороженных пищевых продуктов.

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что водополимерная струя обладает лучшими гидродинамическими свойствами, чем водяная и водоабразивная, обеспечивает высокую производительность при высоком качестве поверхности разрезов в пищевом продукте. Поэтому использование водополимерной струи для разрезания замороженных пищевых продуктов наиболее целесообразно.

Литература:

1. Саленко, О.Ф. Эффективне гідрорізання [Текст] / О.Ф. Саленко, В.Б. Струтинський, М.В. Загірняк. – Кременчуг: КДПУ. – 2005. – 487 с.
2. Proceedings of the 8th American Water Jet Conference [Text] / Ed. Thomas J. Labus. – Houston, Texas. – 1995.– Vol. II. – 907 p.
3. Степанов, Ю.С. Прогрессивные технологии гидроструйного резания материалов [Текст] / Ю. С. Степанов, М.А. Бурнашов, К.А. Головин. – Тула: Изд-во Тул. гос. ун-та. – 2009. – 318 с.

4. *Мурашов, И.Д.* Инновационный метод разделки мяса высокоэнергетической гидроструей [Текст] / И.Д. Мурашов, С.И. Хвыля, Т.М. Гиро // Аграрный научный журнал.– 2014. – № 9. – С. 43–46.

5. *Pogrebnyak, A.V.* Peculiarities of polyethyleneoxide solution streaming through jet-shaping head while cutting foodstuffs [Text] / A.V. Pogrebnyak, Yu.F. Ivanyuta // Обладнання та технології харчових виробництв. – Донецьк: Донец. держ. ун-т економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського. – 2014. – Вип. 32. – С. 50–59.

6. *Погребняк, А.В.* Высокоэффективное гидрорезание твердых пищевых продуктов и материалов [Текст] / А.В. Погребняк // Управление реологическими свойствами пищевых продуктов. – М.: Изд-во Моск. гос. ун-та пищ. производств. – 2008. – С. 173–179.

7. *Погребняк, А.В.* Гидроструйная обработка пищевых продуктов [Текст] / А.В. Погребняк // Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності. – Харків, Мелітополь: ХДУХТ, ТДАТУ.– 2015. – С. 14–19.

8. *Eisenberg, D.* The Structure and Properties of Water [Text] / D. Eisenberg, W. Kauzmann.– New York, Oxford: Oxford University. – 1969. – 261 p.

9. *Pogrebnyak, A.V.* Structure formation in polyethyleneoxide solution streaming through jet-shaping head while cutting foodstuffs [Text] / A.V. Pogrebnyak, Yu.F. Ivanyuta Yu.F. // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств.– 2015.– № 1(23). – С. 138–141.

10. *Deynichenko, G. V.* The nature of increased cutting ability of a polyethylene oxide solution jet while processing food products [Text] / G. V. Deynichenko, A. V. Pogrebnyak, Yu.F. Ivanyuta // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств.– 2015.– № 3(25). – С. 6–13.

11. Encyclopedia of Polymer Science and Technology [Text] / Ed. Mark H. – New York: John Wiley. – 1967, – Vol. 6, – 818 p.

## ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ ГІДРОСТРУМІННОЇ ОБРОБКИ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ РІЗАННЯМ

Погребняк А.В., Погребняк В.Г.

**Анотація** – закономірності процесу гідрорізання харчових продуктів досліджувалися з метою підвищення його ефективності та поліпшення якості поверхні розрізів шляхом модифікації робочої рідини. Експериментально доведено, що використання в якості робочої рідини водних розчинів поліетиленоксиду підвищує оптимальну відстань між поверхнею харчового продукту і зрізом

**сопла в 15 разів, глибину різу в 4 рази, а також покращує якість поверхні розрізу харчового продукту.**

## **FEATURES OF THE HYDROJET PROCESS FOODSTUFF BY CUTTING**

A. Pogrebnyak, V. Pogrebnyak

### *Summary*

**The main task of the study to be solved by the given work consists in ascertainment of regularities of the process of hydrocutting frozen foodstuff. It has been experimentally proven that using polyethyleneoxide water solutions as a working liquid while cutting frozen food products substantially increases efficiency of hydrocutting process and quality of the cut surface. Understanding the nature of increased cutting power of water-polymer jet will make it possible to develop recommendations on choosing regimes for water-polymer jet processing of foodstuff by cutting.**