



А. В. Погребняк

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Ивано-Франковск, Украина

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКО-ПРОМЫШЛЕННАЯ АПРОБАЦИЯ ВОДО-ПОЛИМЕРНОЙ ГИДРОРЕЖУЩЕЙ УСТАНОВКИ

Предложен инженерный метод расчета параметров комплекта оборудования для водополимерной обработки замороженных пищевых продуктов резанием, который позволил разработать проектно-техническую документацию на гидрорежущую установку. Исследовательско-промышленная апробация изготовленного опытного образца установки для гидроструйной водополимерной обработки пищевых продуктов резанием показала увеличение рациональной скорости реза более чем в 2 раза, оптимального расстояния между поверхностью пищевого продукта и срезом сопла – в 15 раз, глубину реза – в 4 раза при скорости реза 0,100 м/с, а также улучшение качества поверхности разреза пищевого продукта в сравнении с водорезанием. За счет оптимизации процесса гидроструйной водополимерной обработки пищевых продуктов резанием существенно понижено рабочее давление (в 4-5 раз), что позволило изготовить опытный образец гидрорежущей установки со стоимостью в 10 раз меньшей, чем стоимость стандартного оборудования. Анализ экспериментальных и расчетных данных показал, что получаемый на опытном образце установки более высокоэффективный процесс гидроструйной водополимерной обработки пищевых продуктов резанием, чем на стандартном оборудовании, обусловлен прежде всего тем, что водополимерная струя формировалась с лучшими гидродинамическими свойствами. Подтверждена практическая целесообразность и экономическая эффективность гидроструйного водополимерного резания.

Ключевые слова: водополимерная обработка; струеформирующая головка; сопло; раствор полимера; время релаксации; продольный градиент скорости.

Введение. Опыт применения водополимерных струй в качестве режущего инструмента для разрезания пищевых продуктов, который имеется на кафедрах оборудования пищевой и отельной индустрии им. М. И. Беляева Харьковского государственного университета питания и торговли, а также оборудования пищевых производств ДонНУЭТ им. Михаила Туган-Барановского, выявил целый ряд достоинств, присущих hydrojet-технологии. В исследовательских работах (Pogrebnyak & Deynichenko, 2016; Pohrebniak & Naumchuk, 2012; Pogrebnyak, 2015; Zapletnikov, et al., 2013; Pogrebnyak, 2008; Deynichenko & Pogrebnyak, 2015; Pogrebnyak & Voloshin, 2010) была доказана перспективность технологии гидрорезания, особенно, для резки продуктов питания при $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже, т.к. при таких температурах традиционными методами это сделать практически невозможно.

Сегодня для внедрения hydrojet-технологии в пищевую промышленность необходимо приобретение дорогостоящего оборудования высокого давления (до 300–500 МПа), требующее не только значительных одноразовых затрат, но и затрат на его дальнейшее обслуживание. Указанное обстоятельство и стало определяющим в постановке задачи разработки высокоэффективного процесса гидроструйной обработки пищевых продуктов резанием и устройств для его реализации.

Результаты исследования и их обсуждение. Проведенное комплексное исследование, направленное на установление рациональных параметров гидрорежущей

установки, позволило предложить новую конструкцию струеформирующей головки с изменяемой конфигурацией проточной части (Pogrebnyak, 2017), а также разработать приведенный ниже метод расчета параметров основных компонентов оборудования для высокоэффективной гидроструйной водополимерной обработки пищевых продуктов резанием, базирующийся на установленном механизме формирования качественной гидроструи и новых путях совершенствования процесса гидрорезания пищевых продуктов (Pogrebnyak & Deynichenko, 2016; Pohrebniak & Naumchuk, 2012; Pogrebnyak, 2015, Pogrebnyak, 2014; Pogrebnyak & Ivanyuta, 2015; Deynichenko, Pogrebnyak & Ivanyuta, 2015).

Исходные данные для расчета включают элементы гидрорежущей пищевые продукты струеформирующей головки, мощность насосной установки N_p и давление водного раствора полимера перед насадкой ΔP_0 , выбираемые в соответствии с решаемыми технологическими задачами, а также количество одновременно работающих водополимерных струй n и коэффициент полезного действия насоса η ($\eta=0,6\div 0,8$).

В результате расчета определяются: технологически обоснованный угол входа в сопло β° и диаметр выходного отверстия сечения струеформирующей головки d_0 , длина проточного канала струеформирующей головки l_k и его диаметр d_k , а также длина начального участка водополимерной струи $l_{н.с.}$, характеризующая качество формирования гидрорежущей водополимерной струи. Указанные параметры определяются, используя уста-

Цитування за ДСТУ: Погребняк А. В. Дослідно-промислова апробация водополимерної гідрорізальної установки. Науковий вісник НЛТУ України. 2017. Вип. 27(4). С. 133–136.

Citation APA: Pogrebnyak, A. V. (2017). Research and Industrial Approbation of the Installation for Water-Polimer Hydro-Cutting. Scientific Bulletin of UNFU, 27(4), 133–136. <https://doi.org/10.15421/40270429>

новленные в работе закономерности проявления эффектов упругих деформаций при течении во входной области сопла водных растворов ПЭО (Pogrebnyak, 2017; Pogrebnyak, 2014; Pogrebnyak & Ivanyuta, 2015; Deynichenko, Pogrebnyak & Ivanyuta, 2015). Гидравлические режимы, выбираемые при проектных проработках конструктивных особенностей сопел гидрорежущей струеформирующей головки, рассчитываются с использованием классического гидродинамического метода, в основу которого положен не линейный закон проницаемости сопла, а обобщенный закон протекания через сопло в виде

$$\frac{\Delta P}{L_n} = \eta_j \frac{v_\phi}{4A} + \eta_\varepsilon \frac{v_\phi}{4A}, \quad (1)$$

где: ΔP – перепад давления на длине отверстия сопла L_n ; v_ϕ – скорость истечения; A – коэффициент проницаемости сопла гидрорежущей головки.

Порядок расчета:

Определение угла входа в сопло β° и диаметра выходного отверстия сечения струеформирующей головки d_o проводится с учетом выполнения условия формирования динамических надмолекулярных структур в водных растворах ПЭО при их истечении из сопла (Pogrebnyak, 2017)

$$\frac{\theta_0 \cdot \exp\{([\eta]_0 \cdot C)\} \cdot 2 \cdot Q \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}}{d_k^3} \geq \operatorname{De}_{\text{кр}}, \quad \text{при } \beta^\circ < \frac{\pi}{2}. \quad (2)$$

В качестве критического (кажущегося) числа Дебори берется число, при котором начинает проявляться у водополимерной струи более высокая, чем у водяной струи, режущая способность. В соответствии с экспериментальными данными (Pogrebnyak & Deynichenko, 2016; Pogrebnyak, 2015), для практически важных диапазонов концентраций (0,001-0,05 %) и мол. масс ($3 \cdot 10^6$, $4 \cdot 10^6$ и $6 \cdot 10^6$) водных растворов ПЭО, критическое число Дебори равно 1,0.

Гидравлическая мощность установки для обработки водополимерной струей пищевых продуктов резанием определяется по формуле (Nikonov, et al., 1973) $N_r = 35,1 \cdot \mu \cdot d_0^2 \cdot p_0^{1,5}$, где: N_r – гидравлическая мощность гидрорежущей водополимерной струи, Вт; d_0 – диаметр сопла, мм; ΔP_0 – давление водного раствора ПЭО перед соплом, МПа.

Определяется установочная мощность насоса высокого давления: $N_y = N_r / \eta$, где: N_y – установочная мощность насоса, кВт; N_r – гидравлическая мощность гидрорежущей водополимерной струи, кВт; η – коэффициент полезного действия насоса высокого давления ($\eta=0,6 \div 0,8$).

Определяется суммарный расход водного раствора ПЭО высокого давления: $Q_v = 2,1 \mu n d_0^2 \Delta P_0^{0,5}$, где: Q_v – расход водного раствора ПЭО, л/мин; μ – коэффициент расхода сопла ($\mu \sim 0,81$). По каталогам фирм, производящих насосное оборудование, производится выбор модели насоса, соответствующей параметрам N_y , Q_v и ΔP_0 .

Определение диаметра сопла гидрорежущей струеформирующей головки: $d_k = K_n(d_o)_{\text{max}}$, где: d_k – внутренний диаметр подводящего канала, мм; $K_n = d_k/d_o$ – коэффициент поджатия потока в струеформирующей головке ($K_n=8 \div 10$); $(d_o)_{\text{max}}$ – максимальный диаметр сопла установки для обработки водополимерной струей пищевых продуктов резанием, мм.

Длина подводящего канала определяется из выражения (Zapletnikov, et al., 2013) $l_k \geq (20 \div 40)d_k$, где l_k – длина проточного канала, мм.

Безразмерная длина начального участка гидрорежущей водополимерной струи $l_{n,c}/d_o$ определяется по формулам:

$$\frac{l_{n,c}}{d_o} = \frac{l_n}{d_o} \cdot \varepsilon \cdot \theta_c \quad (3)$$

$$\text{и} \quad \left(\frac{l_n}{d_o}\right) = 25 \left(\frac{d_o}{R_{za}}\right)^{1/6} \lg K_n \left(1 - 1,25 \cdot e^{-0,095 \frac{l_k}{d_k}}\right), \quad (4)$$

где: (l_n/d_o) – безразмерная длина начального участка водяной струи; $K_n = d_k/d_o$ – коэффициент поджатия потока в струеформирующей головке (при $l_k/d_o > 10$ принимается $K_n=10$); l_k/d_o – отношение длины подводящего канала к его диаметру; R_{za} – параметр шероховатости внутренней поверхности струеформирующей головки и подводящего канала.

Влияние молекулярной массы ПЭО и его концентрации в водном растворе учитывается зависимостью $l_{n,c}$ от времени релаксации водных растворов ПЭО.

Диаметр гидрорежущей водополимерной струи по её длине определяется из зависимостей:

$$\frac{l_{n,c}}{d_o} = \frac{l_n}{d_o} \cdot \varepsilon \cdot \theta_c \quad (5) \quad \text{и} \quad d_c = \frac{K_1(d_0)^2}{l_{n,c}} \left(\frac{l_0}{d_o}\right)^{0,65} + d_o, \quad (6)$$

где: ε – продольный градиент скорости во входной области сопла; d_c – диаметр водополимерной струи, мм; $l_{n,c}$ – длина начального участка водополимерной струи, мм; l_0/d_o – безразмерное расстояние от среза сопла до рассматриваемого сечения; K_1 – коэффициент, величина которого зависит от расстояния между рассматриваемым сечением и срезом сопла гидрорежущей струеформирующей головки. K_1 определяется из выражения: $K_1=2,718(d_0)^{0,5}$.

Табл. Основные технические характеристики опытного образца водополимерной гидрорежущей установки

№ п/п	Наименование характеристик и параметров	Значение
1	Рабочая жидкость	раствор ПЭО
2	Стабилизатор старения водного раствора ПЭО	0,05 % KI
3	Номинальное рабочее давление струи воды, МПа	100
4	Объем камеры ресивера, м ³	0,02
5	Номинальный расход раствора ПЭО не более, л/мин	0,5 ÷ 1
6	Тонкость фильтрации воды, мкм	1
7	Диаметр струеформирующего сопла, мм	0,30
8	Угол входа в сопло	0,55 π
9	Материал струеформирующих сопел	сапфир
10	Объем сосуда Дьюара СК-16 для жидкого, л	16
11	Точность позиционирования, мкм/м	±100
12	Максимальная скорость перемещения, м/сек	0,055

Предложенный инженерный метод расчета параметров комплектующего оборудования для водополимерной обработки пищевых продуктов резанием позволил разработать проектно-техническую документацию на гидрорежущую пищевые продукты установку. В результате исследовательско-промышленной апробации изготовленного опытного образца были подтверждены технические характеристики, приведенные в таблице.

Данные, характеризующие высокую эффективность изготовленного опытного образца, полученные при исследовательско-промышленной его апробации, изложены в работах (Pogrebnyak & Deynichenko, 2016; Pogrebnyak, 2015; Deynichenko & Pogrebnyak, 2015). Проверка влияния концентрации ПЭО в водополимерной струе на глубину реза h в образцах мяса свинины при температуре $t=-25^{\circ}\text{C}$, давлении $\Delta P_o=100$ МПа и скорости перемещения водополимерной струи $V_n=0,050$ м/с показала, что глубина реза довольно резко возрастает с увеличением концентрации ПЭО в водополимерной струе и достигает максимума при достижении оптимальной величины 0,008 %.

Анализ экспериментальных и расчетных данных показал, что получаемый на опытном образце установки более высокоэффективный процесс гидроструйной водополимерной обработки пищевых продуктов резанием, чем на стандартном гидрорежущем оборудовании, обусловлен прежде всего тем, что водополимерная струя формировалась с лучшими гидродинамическими свойствами. Это позволило обеспечить более высокую производительность и качество поверхностей разреза (рис. 1 и 2, а) не только за счет малых добавок ПЭО в гидрострую, но и за счет оптимизации условий формирования струи с более высоким качеством.

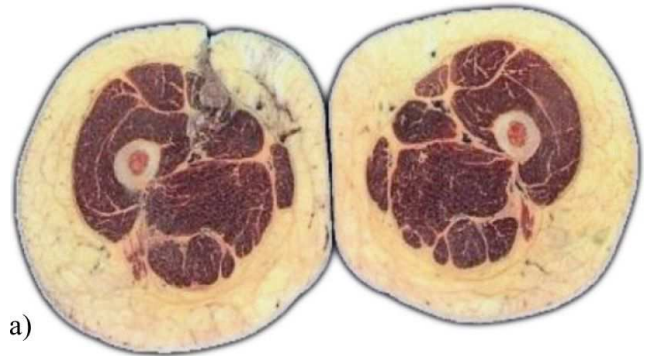


Рис. 1. Поверхность разреза водополимерной струей образца мяса свинины толщиной 0,25 м: $t = -7^{\circ}\text{C}$; $C_{\text{пэо}}=0,007$ %, $M_{\text{пэо}}=4 \cdot 10^{-6}$; $\Delta P_o=100$ МПа; $d_o=0,35 \cdot 10^{-3}$ м; $V_n=25 \cdot 10^{-3}$ м/с

Эксперимент показал, что за счет оптимизации процесса водополимерной обработки пищевых продуктов резанием удалось рациональную скорость реза повысить более чем в 2 раза, оптимальное расстояние между поверхностью пищевого продукта и срезом сопла – в 15 раз, глубину реза – в 4 раза при скорости реза 0,100 м/с, а также удалось существенно понизить рабочее давление (в 4-5 раз), что позволило изготовить опытный образец гидрорежущей установки со стоимостью в 10 раз меньшей, чем стоимость стандартного оборудования.

Исследовательско-промышленная апробация подтвердила также перспективность, предложенного нового способа гидроструйного водополимерного отделения мяса от кости, а также разрезания трубчатых костей (см. рис. 2). Подробное описание способа отделения мяса от кости можно найти в описательной части патента (Pohrebniak, Naumchuk & Ponomarenko, 2013). На рис. 2 показаны фотографии поверхности разреза трубчатой кости, из которых видно, что водополимерной струей обеспечивается более высококачественный разрез кости (см. рис. 2, а), чем водоазотной струей (рис. 2, б). От-

деление мяса от кости (см. рис. 2, б) было осуществлено гидроструйным водополимерным способом.



а)



б)

Рис. 2. Фотография поверхности разреза трубчатой кости водополимерной (а) и водоазотной (б) струями

Выводы. Предложенный инженерный метод расчета параметров комплектующего оборудования для водополимерной обработки пищевых продуктов резанием позволил разработать проектно-техническую документацию на гидрорежущую пищевые продукты установку, исследовательско-промышленная апробация которой показала высокую эффективность процесса гидроструйной водополимерной обработки замороженных пищевых продуктов, практическую целесообразность и экономическую эффективность водополимерной обработки пищевых продуктов резанием.

Перелік використаних джерел

- Deynichenko, G. V., & Pogrebnyak, A. V. (2015). Hydrojet water-polymer cutting of frozen food products. *Progresywni tekhnika ta tekhnologiyi kharchovyh vyrobnyctv restorannogo gospodarstva i tovgivli*, 1(19), 94–103. Kharkiv: State university of food technology and trade Publ.
- 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*, 3(25), 6–13. Series: Processes and Food Production Equipment.
- Nikonov, G. P., Kuzmich, I. A., Ishhuk, I. G., & Goldin, Yu. A. (1973). *Nauchnye osnovy gidravlicheskogo razrusheniya uglja*. Moscow: Nauka, 151 p. [in Russian].
- Pogrebnyak, A. V. (2017). Calculation of Parameters of Jet-Shaping Head for Water-Polymer Processing of Materials by Cutting. *Scientific Bulletin of UNFU*, 27(3), 187–190. <https://doi.org/10.15421/40270342>
- Pogrebnyak, A. V. (2008). Highly effective hydrocutting of firm foodstuff and materials. *Control rheological properties of food*, 2(13), 173–179. Moscow: Moscow State University of food productions.
- Pogrebnyak, A. V. (2014). The nature of increased cutting ability of a polymer solution jet while processing food products. *Articles 27 of the International Symposium on Rheology*, 3, 151–152. Moscow: RAN, MGU.

- Pogrebnyak, A. V. (2015). The process of hydrocutting of food products. *Innovative aspects of development of the equipment of the food and hotel industry in the conditions of the present. Abstracts of papers* (pp. 14–19). Kharkiv: State university of food technology and trade Publ.
- 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*, 3(29), 48–62.
- Pogrebnyak, A. V., & Ivanyuta, Yu. F. (2015). Structure formation in polyethyleneoxide solution streaming through jet-shaping head while cutting foodstuffs. *Scientific journal NRU ITMO*, 1(23), 138–141. Series: Processes and Food Production Equipment.
- Pogrebnyak, V. G., & Voloshin, V. S. (2010). Ecological Technology of Creating Waterproof Screens. Donetsk, Knowledge, 482 p.
- Pohrebniak, A. V., & Naumchuk, M. V. (2012). Pat. 74609 Ukraine, MPK B 03 B 4/00. Vodopolimernyi sposib rizання zamorozhenykh kharchovykh produktiv ta materialiv, № u201202142; zaiavl. 24.02.12; opubl. 12.11.12, Biul. № 21. [in Ukrainian].
- Pohrebniak, A. V., Naumchuk, M. V., & Ponomarenko, E. V. (2013). Pat. 78305 Ukraine, MPK A 22 S 17/40. Sposib viddilennia miasa vid kistky hidrostrumenem, № u201211600; zaiavl. 08.10.12; opubl. 11.03.13, Biul. № 5. [in Ukrainian].
- Zapletnikov, I. M., Poperechnyi, A. M., Pohrebniak, D. O. et al. (2013). *Innovatsiini pidkhody do polipshennia ekspluatatsiinykh kharakterystyk obladnannia kharchovykh vyrobnytstv*. Donetsk: Vyd-vo "Noulidzh", 290 p. [in Ukrainian].

A. В. Погребняк

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна

ДОСЛІДНО-ПРОМИСЛОВА АПРОБАЦІЯ ВОДОПОЛІМЕРНОЇ ГІДРОРІЗАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Запропоновано інженерний метод розрахунку параметрів комплексу обладнання для водополімерного оброблення заморожених харчових продуктів різанням, який дав змогу розробити проектно-технічну документацію на гідрорізальну установку. Дослідницько-промислова апробація виготовленого дослідного зразка установки для гідроструминного водополімерного оброблення харчових продуктів різанням показала збільшення раціональної швидкості різу більш ніж у 2 рази, оптимальної відстані між поверхнею харчового продукту і зрізом сопла – у 15 разів, глибини різу – в 4 рази за швидкості різу 0,100 м/с, а також покращення якості поверхні розрізу харчового продукту порівняно з водорізнанням. Унаслідок оптимізації процесу гідроструминного водополімерного оброблення харчових продуктів різанням знижено робочий тиск (у 4-5 разів), що дало змогу виготовити дослідний зразок гідрорізальної установки з вартістю у 10 разів меншою, ніж вартість стандартного устаткування. Аналіз експериментальних і розрахункових даних показав, що отриманий на дослідному зразку установки більш високоефективний процес гідроструминного водополімерного оброблення харчових продуктів різанням, ніж на стандартному обладнанні, зумовлений передусім тим, що водополімерний струмінь формувався із кращими гідродинамічними властивостями. Підтверджено практичну доцільність і економічну ефективність гідроструминного водополімерного різання.

Ключові слова: водополімерне оброблення; струминоформувальна головка; сопло; розчин полімеру; час релаксації; позовжній градієнт швидкості.

A. V. Pogrebnyak

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

RESEARCH AND INDUSTRIAL APPROBATION OF THE INSTALLATION FOR WATER-POLYMER HYDRO-CUTTING

Experience in the use of water-polymer jets as a cutting tool for cutting food products has revealed a number of advantages inherent in hydrojet-technology. Today, the introduction of hydrojet technology into the food industry requires the purchase of expensive equipment. This circumstance has become crucial in setting the task of developing a highly effective process of hydrojet treatment of food products by cutting. The study presents an engineering method for calculating the parameters of a set of equipment for water-polymer processing of frozen food products by cutting. The method enables the development of design and technical documentation for a hydro-cutting installation. The research and industrial approbation of the produced prototype of the installation for hydrojet water-polymer processing of food products by cutting showed an increase in the rational cutting speed by more than 2 times, the optimum distance between the surface of the food product and the cut of the nozzle by 15 times, the depth of cut by 4 times at a cutting speed of 0.100 m/s, as well as an improvement in the quality of the cut surface of the food product in comparison with water cutting. Due to optimization of the process of hydrojet water-polymer processing of food products, it was possible to significantly reduce the operating pressure (by 4-5 times), which allowed producing a prototype of a hydro-cutting plant with the cost 10 times less than the cost of standard equipment. The research and industrial approbation confirmed the high efficiency of the process of hydrojet water-polymer processing of frozen food products, the practical expediency and cost-effectiveness of water-polymer processing of food products by cutting.

Keywords: water-polymer processing; jet-forming head; nozzle; polymer solution; relaxation time; longitudinal velocity gradient.

Інформація про автора:

Погребняк Андрій Володимирович, канд. техн. наук, доцент, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна. **Email:** Pogrebnyak.AV@mail.ru