

УДК 641.512

Исследование процесса гидрорезания пищевых продуктовКанд. техн. наук **А.В. Погребняк**, Pogrebnyak.AV@mail.ru*Донецкий национальный университет экономики и торговли им. Михаила Туган-Барановского
83055, Украина, Донецк, Театральный пр., 28*Д-р техн. наук **Г.В. Дейниченко**, DeynichenkoGV@rambler.ru*Харьковский государственный университет питания и торговли
61051, Украина, Харьков, ул. Клочковского, 333*

Исследовали закономерности процесса гидрорезания пищевых продуктов с целью повышения его эффективности и улучшения качества поверхности разрезов путем модификации рабочей жидкости. Влияние расстояния от среза сопла до поверхности пищевого продукта на глубину реза изучали при температуре -7 и -25°C , изменении давления от 50 до 150 МПа, диаметре сопла $0,35\cdot 10^{-3}$ и $0,60\cdot 10^{-3}$ м, скорости перемещения гидроструи относительно пищевого продукта 0,015; 0,025; 0,050 и 0,100 м/с. Расстояние от сопла до поверхности пищевого продукта изменялось от $2\cdot 10^{-3}$ до $90\cdot 10^{-3}$ м. Использовали обобщенный анализ экспериментальных данных, методы теории подобия и размерностей, а также методы математической статистики. Получена расчетная зависимость в безразмерном виде для определения глубины реза в пищевом продукте с учетом его прочности на одноосное сжатие, оптимального расстояния между срезом сопла и поверхностью продукта, диаметра сопла, а также гидравлических и режимных параметров гидроструи, скорости перемещения струи и качества ее формирования. Показано, что независимо от температуры пищевого продукта, давления воды и диаметра сопла скорость приращения поверхности разреза с увеличением скорости перемещения высокоскоростной водяной струи вначале повышается, достигает своего максимума, а затем начинает снижаться.

Доказана эффективность гидрорезания при использовании гидроабразивной струи, в которой в качестве абразива используются кристаллики льда или поваренной соли: глубина реза в пищевом продукте (мясе) при температуре -25°C увеличивается в 3–4 раза в сравнении с водяной струей. Понижение температуры водяной струи до -1°C дает скачкообразное увеличение (на 30 и 50% для давлений 150 и 50 МПа, соответственно) глубины реза в замороженном пищевом продукте.

Исследовали влияние концентрации полиэтиленоксида (ПЭО) на глубину и производительность резания замороженных пищевых продуктов при -25°C водополимерной струей с давлением истечения 100 МПа и диаметром сопла $0,35\cdot 10^{-3}$ м. Показано, что рациональная скорость реза возрастает более чем в 2 раза с увеличением концентрации ПЭО в воде и достигает максимума при 0,0013% для мол. массы ПЭО $6\cdot 10^6$ и 0,007% для мол. массы $4\cdot 10^6$. Экспериментально доказано, что использование в качестве рабочей жидкости водных растворов ПЭО повышает 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 улучшает качество поверхности разреза пищевого продукта.

Ключевые слова: пищевые продукты; гидрорезание; глубина реза; ширина реза; качество боковой поверхности разреза; полимерный раствор; полиэтиленоксид.

DOI: 10.17586/2310-1164-2016-9-3-48-62

Foodstuff hydrocutting processPh.D. **Andrey V. Pogrebnyak**, Pogrebnyak.AV@mail.ru*Donetsk National University of Economics and Trade named after Mykhailo Tugan-Baranovsky
83055, Ukraine, Donetsk, Theatre str., 28*D.Sc. **Grygoriy V. Deynichenko**, DeynichenkoGV@rambler.ru*Kharkiv State University of Food Technology and Trade
61051, Ukraine, Kharkiv, Klochkivska str., 333*

The article deals with the regularities of the frozen foodstuff hydrocutting to increase its efficiency and to improve the quality of cut surface by working liquid modification. The influence of the distance from the nozzle edge to the

surface of the food product on the cutting depth is investigated at -7°C , -25°C , pressure change from 50MPa to 150MPa, $0.35\cdot 10^{-3}$ m and $0.60\cdot 10^{-3}$ m nozzle diameter, the speed of waterjet movement over the foodstuff being 0.015 m/s; 0.025 m/s; 0.050 m/s, and 0.100 m/s. The distance from the nozzle to the surface of the foodstuff varied from $2\cdot 10^{-3}$ to $90\cdot 10^{-3}$ m. Generalized analysis of experimental data, the methods of dimensional and statistical analysis is used. A non-dimensional dependence for selecting cutting depth of foodstuff taking into account its strength properties, optimum distance between nozzle edge and food surface, nozzle diameter, as well as waterjet hydraulic and operating parameters waterjet movement speed of and quality of its formation, is shown. Experimental data show that when water jet speed increases cutting surface increment speed also increases, reaches a maximum and then starts decreasing, regardless of the temperature of the food product, water pressure, and nozzle diameter.

A 3–4 times' increase in the efficiency of meat hydrocutting process at -25°C by using the waterjet stream compared to a waterjet in which the salt or ice crystals act as an abrasive crystals is observed. Lowering the temperature of the water jet to -1°C leads to an abrupt increase (by 30 and 50% for pressure of 150 and 50 MPa respectively) cut depth in the frozen food product.

The influence of polyethylene oxide (PEO) concentration on cutting depth and rate for food frozen at -25°C by pressure water-polymer jet of 100 MPa flow pressure and $0.35\cdot 10^{-3}$ m nozzle diameter is investigated. It is shown that rational cutting speed increases more than twice with increasing PEO concentration in water and reaches its maximum at 0.0013% when PEO molecular mass is $6\cdot 10^6$ and 0.007% for molecular mass of $4\cdot 10^6$. It is experimentally proved that when polyethyleneoxide water solutions as a working liquid are used the optimum distance between nozzle edge and food surface increases 15 times, cutting depth at cutting speed of 0.100 m/s – 4 times, and the quality of the cut surfaces is also improved.

Keywords: foodstuff; hydrocutting; cutting depth; cutting width; quality of cut surface; polymer solution; polyethyleneoxide.

Введение

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]. Только в странах дальнего зарубежья имеется опыт гидрорезания тортов, овощей, фруктов, шоколада, различных видов плотных пищевых продуктов [5].

Основной причиной, по которой метод гидрорезания не применяется в пищевой промышленности, является отсутствие комплексных научных исследований данного процесса, а следовательно, и разработок гидрорежущего оборудования для пищевых продуктов [6]. В этой связи, с точки зрения научной новизны, данный метод вызывает значительный интерес.

Опыт применения водяных струй в качестве режущего инструмента для разрезания пищевых продуктов, который имеется на кафедре оборудования пищевых производств ДонНУЭТ им. Михаила Туган-Барановского, выявил целый ряд достоинств, присущих waterjet-технологии. В исследовательских работах [6–8] была доказана практическая целесообразность использования высокоскоростной струи воды, формируемой соплом с выходным отверстием от $0,2\cdot 10^{-3}$ до $0,8\cdot 10^{-3}$ м и давлением перед соплом от 300 до 500 МПа для разрезания замороженных пищевых продуктов. При этом максимальная глубина реза в замороженном блоке филе хека, имеющего температуру -11°C , не превышала $85\cdot 10^{-3}$ м при давлении 500 МПа и диаметре сопла $0,4\cdot 10^{-3}$ м. В замороженных пищевых продуктах при более низких температурах, естественно, глубина реза будет еще меньше. Поэтому понижение температуры пищевого продукта до -25°C и ниже исключает возможность использования водоструйной резки при давлениях меньше 250–300 МПа. Гидрорезание при давлениях 300–500 МПа существенно улучшает качество поверхности разреза в пищевом продукте, но одновременно приводит к удорожанию в 2–3 раза процесса резки. Сегодня для внедрения струйных технологий в пищевую промышленность необходимо приобретение дорогостоящего оборудования высокого давления (до 500 МПа), требующее не только значительных одноразовых затрат, но и затрат на его дальнейшее обслуживание.

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 [6, 8] – стали

определяющими в постановке задачи интенсификации процесса гидрорезания замороженных пищевых продуктов, имеющих практически важные температуры (до -25°C и ниже).

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 с наименьшими энергозатратами на формирование струи. Минимизация энергетических затрат, прежде всего, должна обеспечиваться за счет понижения рабочего давления жидкости перед соплом до самого низкого его значения при сохранении технологических требований к разрезаемому пищевому продукту. Поэтому выбор типа и состава рабочей жидкости является одним из основных вопросов, которые необходимо решать при разработке технологического процесса гидрорезания пищевых продуктов.

Целью данной работы является повышение эффективности процесса гидрорезания и улучшение качества поверхности разрезов путем модификации рабочей жидкости.

Экспериментальная часть

В качестве лабораторного оборудования для исследования процесса гидрорезания замороженных пищевых продуктов использовалась доработанная нами серийно выпускаемая *гидрорежущая установка* УРГ-3020. Доработка заключалась в дооснащении ресивера специально разработанной и изготовленной системой, обеспечивающей охлаждение воды в нем до необходимой температуры.

Устройство повышения давления мультипликаторное – предназначено для сжатия рабочей жидкости до требуемого давления и передачи ее на режущую головку.

Ресивер – предназначен для сглаживания пульсаций давления, создаваемого мультипликатором.

Головка струеформирующая – предназначена для преобразования статического давления рабочей жидкости в кинетическую энергию струи.

Система позиционирования обеспечивает автоматическое перемещение головки, режущей вдоль осей X, Y и Z, согласно заданной программе.

Блок подачи абразива (БПА) – предназначен для хранения и подачи (в наших экспериментах) поваренной соли и частичек льда в дозатор.

Система пневматическая – обеспечивает: подачу абразива из БПА в дозатор по пневмопроводу; отсекаание подачи частичек соли (или льда) из дозатора в головку режущую; прерывание струи рабочей жидкости в струеформирующей головке.

Система ЧПУ «Графика» – осуществляет автоматическое управление УРГ-3020, обрабатывает управляющие команды, поступающие с пультов оператора. Система ЧПУ укомплектована программным обеспечением, позволяющим воспринимать и обрабатывать программы резки. Операционная среда Windows 98, 2000.

Шкаф системный – служит для управления УРГ-3020 в автономном (ручном) и автоматическом режимах.

Компьютер технологический – предназначен для ввода программы резания в систему ЧПУ и корректирования этой программы.

Пульт оператора (ПО) – предназначен для оперативного управления и слежения за процессом резки. Сенсорная панель ПО – для ввода управляющих команд в систему ЧПУ перед началом выполнения программы.

Система термостатирования и охлаждения ресивера с рабочей жидкостью. Анализ методов глубокого охлаждения объектов типа кожухотрубных теплообменников позволил выбрать и применить для решения поставленной задачи метод криостатирования – охлаждения объекта с помощью безмашинной проточной системы хладоснабжения, предусматривающей одноразовое использование криоагента – паров жидкого азота.

Силу воздействия гидроструи на препятствие определяли с помощью терморезисторов, приклеенных на металлической преграде [7].

В качестве сопел использовались сопла фирмы Ргосег (Франция) (рисунок 1) – высокотехнологичные, изготовленные из высокопрочного сплава, а наиболее изнашиваемая часть опрочнена искусственным сапфиром.

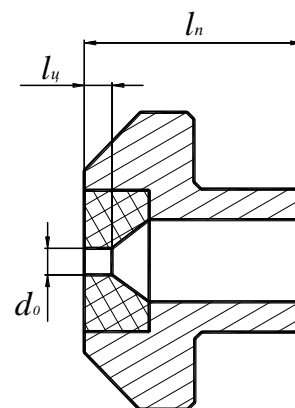


Рисунок 1 – Сопла фирмы Pgoseg

Для сопел с диаметром выходного отверстия d_0 равным $0,35 \cdot 10^{-3}$ и $0,6 \cdot 10^{-3}$ м коэффициент расхода составляет $\mu = 0,81$; длина проточного канала $l_n = 6 \cdot 10^{-3}$ м; длина цилиндрического участка проточной части канала $l_{ц} = 10^{-3}$ м.

Установка для определения предела прочности замороженного пищевого продукта при одноосном сжатии (рисунок 2).

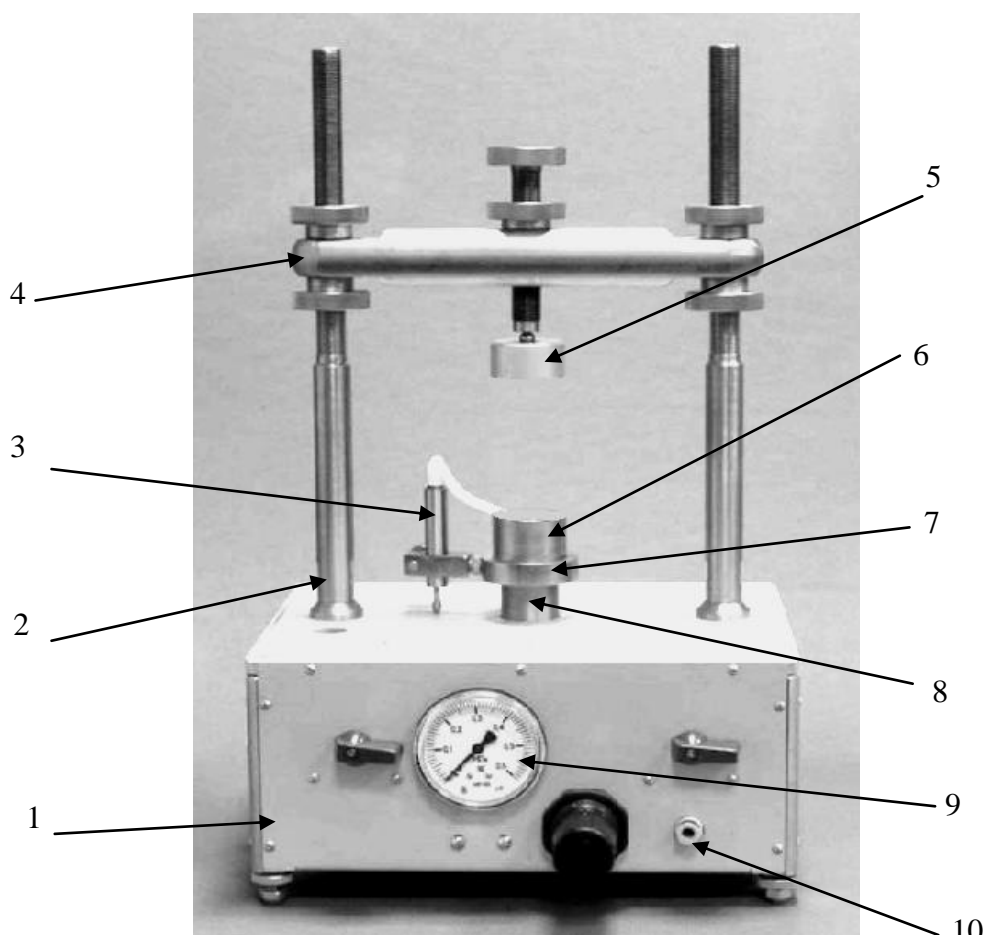


Рисунок 2 – Общий вид прибора Asis Geotek для испытаний материалов на одноосное сжатие

Прибор Asis Geotek состоит из корпуса 1, на котором установлены опорные штанги 2 с опорной переключателем 4. На переключателе установлен верхний пуансон 5. В корпусе находится гидравлический домкрат 8, на котором установлен нижний пуансон 6, с электронным датчиком перемещения 3 и тензодатчиком усилия 7. На переднюю панель вынесены ручки управления, манометр 9 и разъем сигнала усилия и перемещения 10.

В качестве вспомогательного оборудования в комплект прибора входит устройство для вырезания образца замороженного пищевого продукта и устройство для выталкивания образца из цилиндра. Состав и принцип действия этих устройств не требует пояснений.

Для криостатирования образцов пищевых продуктов, испытываемых на одноосное сжатие, использовали специальную камеру-термостат, в которую пищевой продукт помещали вместе с прибором Asis Geotek. Система термостатирования и охлаждения аналогична, описанной выше для охлаждения ресивера с рабочей жидкостью.

Такая же система термостатирования и стабилизации температуры использовалась и в экспериментах при определении твердости НВ и предельного напряжения среза τ_{cp} замороженного пищевого продукта.

Твердость НВ определяли по методу Бринелля (вдавливание стального шарика) в соответствии с требованиями, изложенными в ГОСТ 8.062-85. Данный метод является широко используемым и стандартизированным методом определения твердости в материаловедении. О стабилизации температуры уже было сказано выше.

Предельное напряжение среза τ_{cp} измеряли прибором, который имел в качестве режущего органа цилиндр с внутренним диаметром $2 \cdot 10^{-2}$ м и толщиной стенки 10^{-3} м. Этот метод чрезвычайно прост по своей идее и реализации: основное требование при определении напряжения среза τ_{cp} в термостатировании всей системы соответствующим образом. Значения предельного напряжения среза τ_{cp} для разных пищевых продуктов были получены для интервала температур от -1 до -25°C . Получение значений τ_{cp} не требует специальных пояснений. Ошибка в измерении предельного напряжения среза не превышала 3%.

Температуру рабочей жидкости в ресивере измеряли с использованием термометра сопротивления, помещенного в переходную втулку от ресивера к трубке высокого давления, а температуру гидроструи на выходе из сопла – высокоточным пирометром Kobold. Для измерения температуры прибор наводится на цель, после нажатия курка на дисплее появляется значение температуры. Диапазон измеряемых температур от -30 до $+900^{\circ}\text{C}$. Прибор позволяет проводить измерения температуры с точностью 1% объектов с расстояния в 30 раз большего, чем размеры пятна.

Глубину разреза в замороженном пищевом продукте гидроструей определяли с помощью измерительной металлической линейки – 150 ГОСТ 427-75 и линейки – 500 ГОСТ 427-75. В тех случаях, когда ширина реза была меньше $0,4 \cdot 10^{-3}$ м, для измерения глубины реза использовали щуп серии Щ-137.

Ширину разреза в замороженном пищевом продукте измеряли микроскопом «Мир-2» и щупом серии Щ-137.

Профилограммы поверхностей разрезов получали щуповым методом измерения. Точность, размеры и технические условия эксплуатации профилографов-профилометров регламентированы ГОСТ 19299-73 и ГОСТ 19300-73.

Качество поверхности разрезов в замороженном пищевом продукте определяли с использованием профилограф-профилометра блочной конструкции модели 202. Прибор имеет малое измерительное усилие, благодаря чему можно измерять параметры шероховатости и волнистости образцов из относительно мягкого материала, каким, в нашем случае, являются замороженные пищевые продукты, т.е. без повреждения поверхности разрезов пищевых продуктов. Погрешность показания прибора не превышает 10%.

Результаты и их обсуждение

В качестве основных критериев оценки эффективности процесса гидрорезания замороженных пищевых продуктов нами были приняты – глубина реза h и скорость приращения боковой поверхности разреза S_0 . Скорость приращения боковой поверхности разреза является важнейшей характеристикой процесса при разрезании любого материала и характеризует производительность данного процесса. Основные факторы, от которых зависит производительность гидрорезания, можно разбить на три группы:

- силовые и геометрические свойства режущей струи;
- взаимное расположение струи и разрезаемого пищевого продукта;
- физико-механические свойства пищевого продукта и его линейные размеры.

Ниже рассмотрим влияние геометрических и динамических параметров гидроструи на показатели процесса гидрорезания замороженного пищевого продукта, имеющего разную отрицательную температуру.

Экспериментальное исследование влияния расстояния от среза сопла до поверхности разрезаемого замороженного пищевого продукта l_0 на глубину реза h проводилось на образцах мяса свинины при температуре -7 и -25°C и изменении давления воды ΔP_0 от 50 до 150 МПа, диаметре сопла d_0 $0,35 \cdot 10^{-3}$ и $0,6 \cdot 10^{-3}$ м, скорости перемещения гидроструи относительно образца замороженного мяса $V_{п}$ 0,015; 0,025; 0,050 и 0,100 м/с. Расстояние от сопла до поверхности разрезаемого мяса l_0 изменялось от $2 \cdot 10^{-3}$ до $90 \cdot 10^{-3}$ м.

Данные, характеризующие влияние расстояния от среза сопла до поверхности разрезаемого мяса на глубину реза, приведены на рисунке 3.

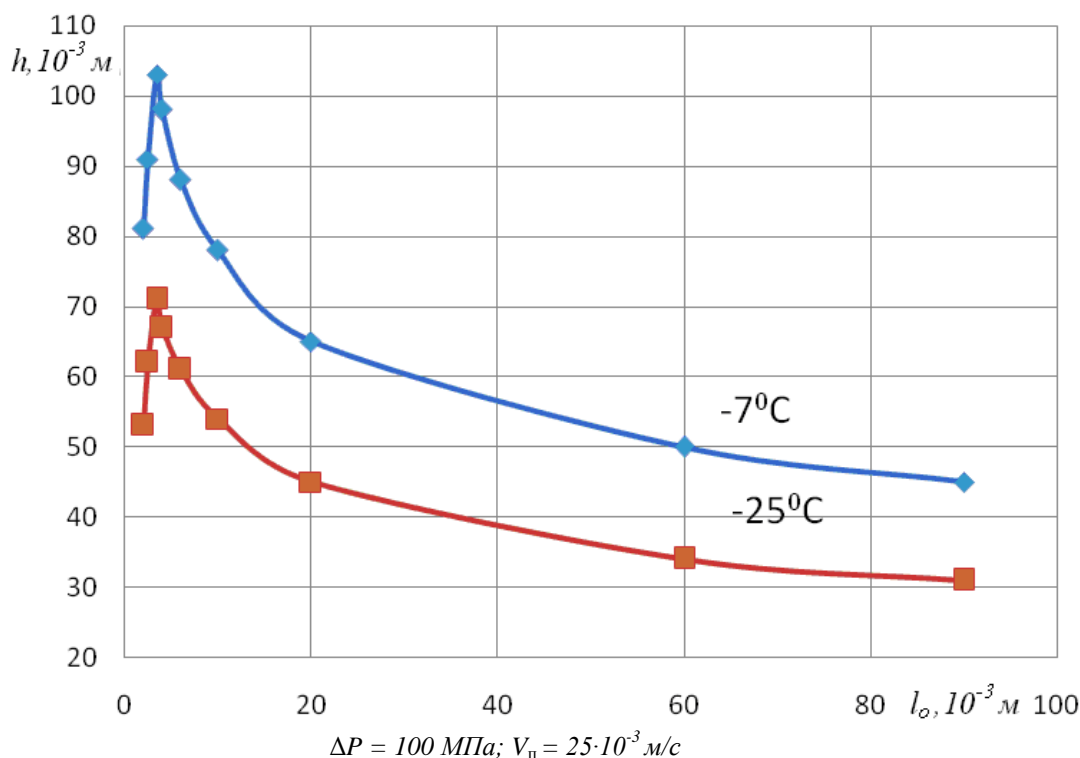


Рисунок 3 – Зависимость глубины реза от расстояния между срезом сопла диаметра $0,35 \cdot 10^{-3}$ м и поверхностью замороженного мяса при разрезании мяса струей воды

Видно, что зависимость глубины реза h от расстояния между срезом сопла и поверхностью замороженного пищевого продукта (мяса) 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 ΔP_0 , диаметров сопел d_0 и скоростей перемещения гидроструи относительно образца замороженного пищевого продукта $V_{п}$. При относительно малых расстояниях от 0 до некоторого $l_{\text{опт}}$, 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 $l_{\text{опт}}$. При этом расстояние, соответствующее максимальной глубине реза h_{max} , является с этой точки зрения рациональным.

Экспериментальные результаты, которые показывают, как меняется безразмерная глубина разреза h/h_{max} в образце замороженного мяса от безразмерного расстояния до среза сопла l_0/d_0 , представлена на рисунке 4.

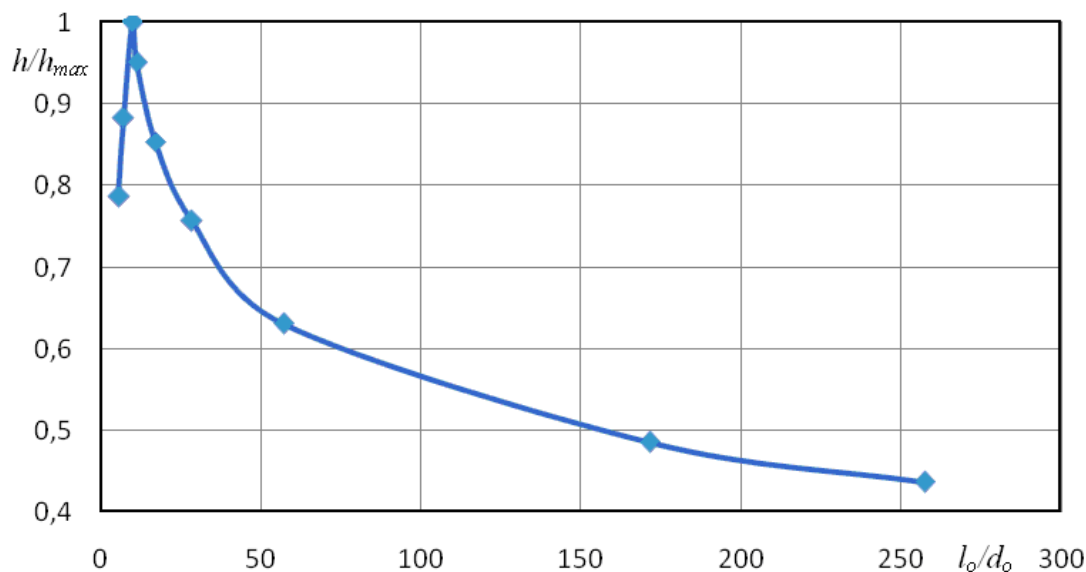


Рисунок 4 – Влияние безразмерного расстояния от среза сопла до поверхности разрезаемого мяса на безразмерную глубину реза для сопла диаметра $0,35 \cdot 10^{-3}$ м и давления 100 МПа.

Необходимо иметь в виду, что уменьшение l_0 относительно l_{opt} , 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_{opt} .

Обращает на себя внимание обнаруженная нами независимость величины l_{opt} от давления воды перед соплом ΔP_0 и скорости перемещения гидроструи относительно образца замороженного пищевого продукта V_n , что свидетельствует о сложном характере истечения воды из сопла, и естественно, изучение одних только интегральных динамических параметров гидроструи недостаточно для понимания наблюдаемых явлений.

Следует указать на важный отрицательный эффект, возникающий при высоких рабочих давлениях – существенное повышение температуры водяной струи из-за эффекта Джоуля-Томсона. Температура водяной струи при давлении 700 МПа может достигать 100°C . Повышение температуры водяной струи с ростом давления, с одной стороны, ограничивает использование высоких давлений, т. к. температура водяной струи не может превышать 100°C , а с другой стороны, повышенная температура режущей струи неблагоприятно влияет на качество разрезаемого пищевого продукта.

В работе [8], используя обобщенный анализ экспериментальных данных, методы теории подобия и размерностей, а также методы теории вероятностей и математической статистики, нами была получена расчетная зависимость в безразмерном виде для определения глубины реза (h) в пищевом продукте с учетом его прочности на одноосное сжатие ($\sigma_{сж}$), оптимального (l_{opt}) расстояния (l_0) между срезом сопла и поверхностью пищевого продукта, диаметра сопла (d_0), а также гидравлических (ΔP_0) и режимных параметров гидроструи (V_0), скорости перемещения струи (V_n) и качества ее формирования (с учетом ранее полученной связи между l_{opt} и l_k – длиной подводящего канала, d_k – его диаметром, l_n – длиной начального участка струи). Важной особенностью данного уравнения является то, что оно учитывает качество формирования гидроструи.

Параметрами процесса разрезания пищевого продукта, характеризующими его производительность, являются скорость приращения боковой поверхности разреза S_0 , которая равна произведению h на V_n . На рисунке 5 представлены результаты проведенных экспериментов по влиянию скорости перемещения гидроструи V_n относительно разрезаемого образца пищевого продукта на скорость приращения боковой поверхности разреза S_0 .

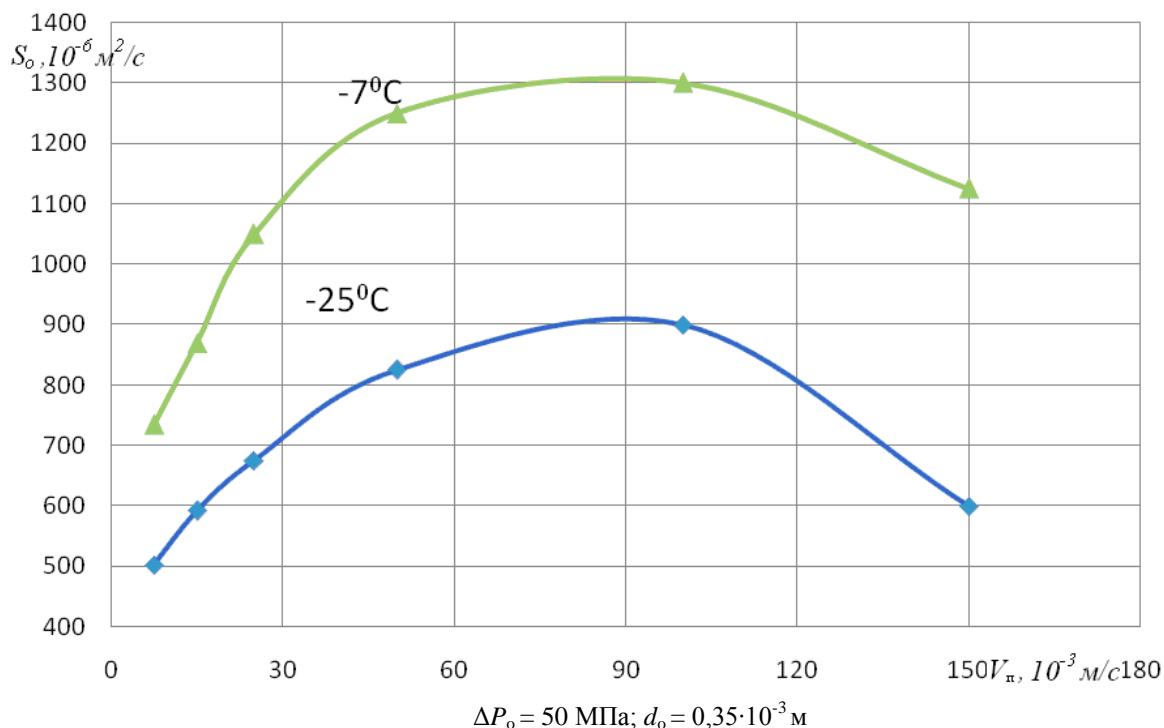


Рисунок 5 – Зависимость скорости приращивания боковой поверхности разреза от скорости перемещения гидроструи относительно разрезаемого образца мяса при $l_o = l_{\text{опт}}$

Анализ экспериментальных данных рисунка 5 показывает, что независимо от температуры пищевого продукта, давления воды и диаметра сопла скорость приращивания поверхности разреза с увеличением скорости перемещения высокоскоростной водяной струи вначале увеличивается, достигает своего максимума и начинает уменьшаться, т.е. изменяется по зависимости близкой к параболической. Полученный вид зависимости S_o от V_n обусловлен тем, что большей глубине реза соответствует меньшее значение V_n , и наоборот, большей скорости перемещения гидроструи относительно замороженного пищевого продукта соответствует меньшее значение h . Естественно, что скорость приращивания поверхности разреза, равная произведению этих величин, на границах исследуемого диапазона изменения V_n будет меньше, чем в его середине.

Резюмируя, можно сказать, что интерпретация полученных экспериментальных данных влияния геометрических и динамических параметров гидроструи на показатели процесса гидрорезания требует решения вопроса о структуре гидроструи с момента ее зарождения в воздушной среде до вырождения в капельный поток при различных режимах истечения воды из сопла и степени силового воздействия гидроструи на препятствие по оси потока.

Гидроабразивное резание. Одним из методов повышения эффективности процесса гидрорезания, существенно расширяющим его технологические возможности, является введение в режущую струю жидкости абразивных добавок. Это позволяет вести резку высокопрочных материалов, в том числе сталей, при относительно низких давлениях порядка 300–500 МПа, обеспечивая при этом такую же производительность, как при резке чистой жидкостью (водой) с давлением истечения до 700 МПа [5, 9]. Гидроабразивное резание основывается на воздействии на разрезаемый материал абразивных частиц, разгоняемых струей жидкости до сверхзвуковых скоростей.

Идея использования водяной струи, ускоряющей абразивные частицы, не является новой. Этот способ, начиная с 1980 года, очень быстро расширяется и охватывает множество отраслей промышленности [9–11]. Однако в пищевой промышленности до настоящего времени способ водорезания, а тем более гидроабразивный, не используется по следующим основным причинам. Это сложный физический процесс, зависящий от большого числа разнообразных факторов, причем их влияние на процесс гидрорезания зависит от разрезаемого материала, имеет сложный взаимозависимый характер с трудно прогнозируемым результатом. В настоящее время для каждой отрасли промышленности разрабатывается своя конкретная гидрорежущая установка, работающая с чистой водой

или по способу ускорения абразивных частиц. Каждая конструкция гидрорежущей установки имеет свой индивидуальный параметр, не зависящий от давления воды, но характеризующий эффективность процесса гидрорезания и зависящий от конструктивного оформления, геометрических характеристик и качества изготовления отдельных органов гидрорежущего оборудования, а также от характеристик разрезаемого материала и используемого абразива при гидроабразивной резке.

В настоящее время используется следующий материал абразива: гранат, оксид алюминия, карбид кремния, стальная дробь, медный шлак, кварцевый песок (диоксид кремния), стеклянная крошка [1, 5, 12]. Наиболее распространенным для применения является кварцевый песок, прежде всего, из-за его низкой стоимости. Естественно, ни один из используемых на практике абразивных материалов нельзя применить для гидрорезания пищевых продуктов. В такой ситуации перспективным путем повышения эффективности процесса гидрорезания замороженных пищевых продуктов может быть применение гидроабразивного – водолеяного метода, т.е. когда абразивным материалом являются частицы льда.

Гидроабразивная – водолеяная резка позволяет существенно повысить эффективность процесса гидрорезания за счет осуществления работы с частицами льда, имеющими температуру от -90 до $-195,8^{\circ}\text{C}$ (до температуры жидкого азота). Чем ниже температура льда, тем выше его прочность, а следовательно, и режущая способность водолеяной струи. Как показали исследования, понижение температуры частиц льда с -30 до -90°C повышает производительность разрезания большинства твердых материалов в несколько раз (до 4-х) при прочих равных условиях. Кроме того, водолеяные струи в пищевой промышленности перспективны в использовании для чистки внутренних поверхностей пищевого оборудования и отделении мяса от кости.

Экспериментальная проверка возможности использования водяной струи с частицами льда для расширения технологических возможностей гидрорезания замороженного пищевого продукта была осуществлена нами совместно с сотрудниками кафедры «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика» ГОУ ВПО «Орловский государственный технический университет» (Орел, Россия). Эксперименты были выполнены на модельных образцах мяса, в качестве которых использовался лед.

Образец льда имел температуру -30°C , что соответствует прочности свиного мяса на одноосное сжатие, имеющего температуру -25°C . Оптимальный расход частиц льда, при котором достигается максимальная глубина реза, является постоянной индивидуальной характеристикой конкретной гидрорежущей установки и в данном случае расход составлял $158\text{ см}^3/\text{с}$.

При указанных условиях гидрорезания модельного образца мяса получено существенное увеличение эффективности процесса за счет использования гидроабразивной струи, в которой роль абразива играют мелкие частицы льда. Например, если в модельном образце мяса глубина реза чистой водой составила $0,3 \cdot 10^{-3}$ м, то при использовании льда в качестве абразивного материала при прочих равных условиях получили сквозной разрез (более 0,4 м) образца с высоким качеством поверхности разреза. Исследовать модельные образцы мяса размером свыше 0,4 м не представлялось возможным из-за конструктивных особенностей гидрорежущей установки.

Следовательно, можно 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.

Наиболее перспективным с точки зрения эффективности процесса гидрорезания замороженных пищевых продуктов может стать предложенный и реализованный нами гидроабразивный – водосолевой метод, при осуществлении которого в качестве абразива используется поваренная соль. Гидроабразивное резание, как уже отмечалось, основывается на воздействии на разрезаемый материал абразивных частиц, разгоняемых струей жидкости до звуковых и сверхзвуковых скоростей. Поэтому, повышение плотности гидроструи, за счет внедренных в нее абразивных частиц с плотностью выше плотности воды, приводит к увеличению ее энергетических возможностей. Плотность поваренной соли $2,16\text{ г}/\text{см}^3$, а кварцевого песка, наиболее часто используемого при гидроабразивном резании, – от $2,2$ до $2,65\text{ г}/\text{см}^3$. Можно считать, что плотности кварцевого песка и поваренной соли практически равны.

Эксперимент показал, что при водосолевом гидроабразивном резании замороженного пищевого продукта, наблюдается существенное увеличение эффективности процесса (таблица 1).

Таблица 1– Влияние расхода абразива на глубину реза в мясе при температуре -25°C и давлении 100 МПа

t, °C	Глубина реза h , 10^{-3} м			
	Расход абразива, 10^{-3} кг/с			
	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 в отличие, например, от кварцевого песка осложняется ее растворимостью в воде, и чем выше температура воды, тем выше скорость растворения соли. Температура водяной струи в наших экспериментах составляла $45\div 55^{\circ}\text{C}$, а при давлении 500 МПа $\sim 70^{\circ}\text{C}$. Понижение температуры может значительно снизить скорость растворения поваренной соли в воде, а следовательно, увеличить эффективность гидроабразивного – водосолевого метода разрезания замороженного пищевого продукта при пониженном расходе соли.

Становится очевидным, что для понимания физического механизма и научно-обоснованного управления процессом гидрорезания необходимо знание особенностей этого процесса в условиях пониженных и отрицательных температур. Вопросы, связанные с влиянием пониженных температур на эффективность процесса гидрорезания замороженного пищевого продукта рассмотрим ниже.

Гидрорезание при пониженных температурах струи. Обсуждение свойств рабочей жидкости, в качестве которой используется вода, без учета соответствующей диаграммы состояния, зачастую порождает массу недоразумений и заблуждений при их интерпретации. Анализ диаграммы состояния воды позволяет сделать достаточно корректные заключения о структурообразовании и предсказать возникновение тех или иных структурных форм на разных участках фазовой диаграммы, что поможет при обосновании рациональных параметров оборудования для гидрорезки пищевых продуктов.

Для реализации процесса гидрорезки при пониженных температурах гидроструи представляют интерес аномальные свойства воды – область ее жидкого состояния [13]. Одной из ее отличительных особенностей от других веществ, является понижение температуры кристаллизации с ростом давления, что позволяет понижать температуру воды, не переводя ее в твердое состояние – лед в ресивере гидрорежущей установки до -22°C при рабочем давлении 207 МПа.

С точки зрения решения поставленных в данной работе задач, во-первых, нам необходимо было охладить температуру водяной струи до рациональных значений, при которых в момент ее контакта с разрезаемым замороженным пищевым продуктом не происходило бы ухудшение его качества; во-вторых, если температура в момент зарождения в воздушной среде струи будет ниже 0°C , то в ней начнут образовываться микрокристаллики льда, играющие роль абразивных добавок. Высокая эффективность использования водяной струи с введенными в нее мелкими частицами льда для расширения технологических возможностей гидрорезания замороженного пищевого продукта была подтверждена рассмотренными выше опытами. Поэтому, можно предположить, что генерирование микрокристалликов льда в водяной струе путем понижения температуры воды в ресивере до соответствующих отрицательных значений, также приведет к повышению эффективности процесса гидрорезания замороженного пищевого продукта, как и «крошечные» частицы льда, добавляемые в относительно теплую водяную струю.

Как уже было отмечено, аномальная особенность фазовой диаграммы воды позволяет понижать температуру воды в ресивере гидрорежущей установки до -22°C при рабочем давлении 207 МПа. Если же давление в ресивере выбрать равным 150 МПа, то из диаграммы состояния воды [13] следует, что для получения температуры водяной струи на выходе из сопла -1°C , необходимо температуру воды в ресивере понизить до -15°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°C . То есть, охлаждение воды в ресивере до -15°C при давлении 150 МПа позволяет получить температуру водяной струи на выходе из сопла равную -1°C . В данном случае получается переохлажденная водяная струя, в которой на выходе из сопла, т.е. при попадании в область атмосферного давления, должны генерироваться микрокристаллики льда из-за перехода воды в кристаллическое состояние при атмосферном давлении и температуре ниже 0°C .

Экспериментальное изучение влияния температуры водяной струи на глубину реза проводилось на образцах пищевых продуктов при температуре -25°C , давлениях воды ΔP_0 , 50 и 150 МПа, диаметре сопла d_0 , $0,35 \cdot 10^{-3}$ м и скорости перемещения гидроструи относительно образца замороженного мяса V_n $25 \cdot 10^{-3}$ 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°C , приведены в таблице 2.

Видно, что глубина реза h с понижением температуры водяной струи до 0°C монотонно увеличивается и при 4°C превышает от 6 до 16% глубину реза струей, имеющей температуру 45°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°C , как видно из таблицы 2, приводит к скачкообразному увеличению (до 30 и 50% для давлений 150 и 50 МПа соответственно) глубины реза в замороженном пищевом продукте.

Таблица 2 – Влияние температуры водяной струи на глубину реза в замороженном мясе при -25°C

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

Полученный характер изменения глубины реза в замороженном пищевом продукте при температуре водяной струи ниже 0°C является доказательством того, что в водяной струе с момента ее зарождения в воздушной среде происходит генерирование микрочастиц – кристалликов льда, выполняющих такую же роль, как и заранее приготовленные мелкие частицы льда, подаваемые в теплую струю воды.

Водополимерное резание. В работах [14, 15] нами был решен вопрос о физическом поведении макромолекул в условиях растягивающего потока (течения через струеформирующую головку) и выяснена природа генерируемых под действием продольного гидродинамического поля в растворах полимеров структурных образований с довольно большим временем их жизни. Среди наиболее интересных и практически важных результатов работы [14] является доказательство того, что возникновение «аномального» диссипативного режима течения растворов полимеров при истечении их из коротких капилляров-сопел обусловлено реализацией высоких степеней (вплоть до 60%) развернутости макромолекулярных клубков.

Поэтому повысить эффективность процесса гидрорезания можно, если водяную струю, режущую замороженный пищевой продукт, заменить на водополимерную. При этом полимер должен быть безопасным и разрешенным для использования в пищевой промышленности веществом. Таким полимером может быть полиэтиленоксид (ПЭО) [16], имеющий класс опасности 4 (безопасное вещество) и используемый в пищевой промышленности как загуститель, флокулянт и др.

На рисунке 6 приведена зависимость глубины реза в пищевом продукте (мясе), имеющим температуру -25°C от расстояния между его поверхностью и срезом сопла при различных концентрациях ПЭО молекулярной массы $4 \cdot 10^6$ в воде. 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%.

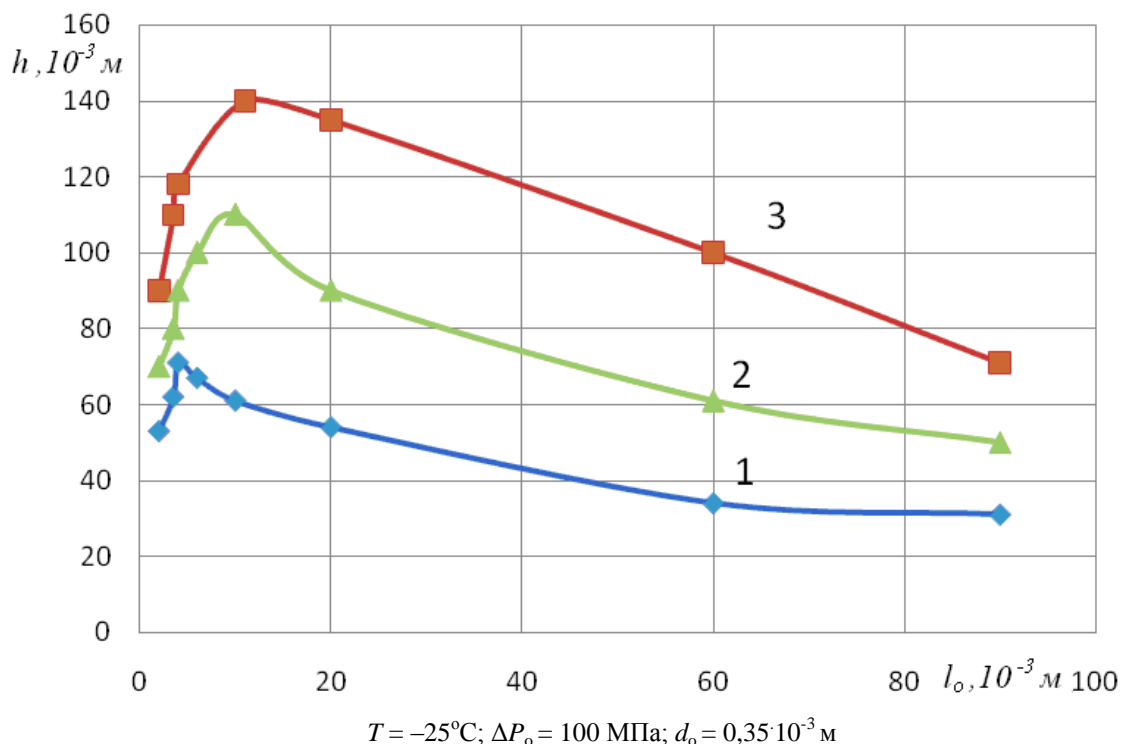


Рисунок 6 – Зависимость глубины реза в мясе от расстояния между его поверхностью и срезом сопла при различных концентрациях ПЭО в воде: 1 – вода; 2 – 0,003%; 3 – 0,007%

В таблице 3 приведена ширина реза в мясе при температуре -25°C в зависимости от расстояния между поверхностью пищевого продукта и срезом сопла.

Таблица 3 – Влияние расстояния между поверхностью мяса и срезом сопла на ширину реза водополимерной и водной струями в замороженном мясе ($C_{\text{пэо}} = 0,007\%$; $\Delta P_o = 100 \text{ МПа}; d_o = 0,35 \cdot 10^{-3} \text{ м}$)

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

Данные таблицы 3 свидетельствуют о том, что водополимерная струя обладает лучшими, чем водная струя гидродинамическими свойствами, обеспечивающими высокую производительность при высоком качестве поверхности разрезов в замороженном пищевом продукте. Например, если струя воды с заданной производительностью обеспечивает высококачественный разрез в замороженном мясе при $l_o = l_{\text{опт}}$, то струя водного раствора ПЭО позволяет получить при сохранении производительности и качества поверхности реза ту же глубину реза при $l_{\text{опт}} = 0,09 \text{ м}$, т.е. оптимальное расстояние повышается в 15 раз. Это дает возможность резать не только более толстые куски пищевого продукта, но и разрезать куски, конфигурация которых не позволяет подвести их поверхность непосредственно к струеформирующей головке или получать необходимые технологические параметры при значительно меньших давлениях.

Исследование влияния концентрации ПЭО на производительность резания замороженных пищевых продуктов при -25°C водополимерной струей с давлением истечения 100 МПа и диаметром сопла $0,35 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ показало, что рациональная скорость реза значительно возрастает с увеличением концентрации ПЭО в воде и достигает максимума при некоторой оптимальной величине $C_{\text{пэо}}$. Экспериментально было получено значительное (выходящее за пределы возможности установки) повышение рациональной скорости перемещения гидроструи относительно образца пищевого продукта (мяса), имеющего температуру -25°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 [14, 15]. Часть энергии струи идет на структурную перестройку потока, что и обуславливает снижение ее средней скорости [7] и увеличение компактности водополимерной струи (таблица 3). Последнее способствует увеличению глубины реза в замороженном пищевом продукте. К увеличению режущей способности водополимерной струи приводит и динамическое структурообразование, наблюдаемое при сходящемся течении (в струеформирующей головке) водных растворов гибкоцепных полимеров [15]. Понимание природы повышенной режущей способности водополимерной струи позволяет разработать рекомендации по выбору режимов гидроструйной водополимерной обработки пищевых продуктов резанием.

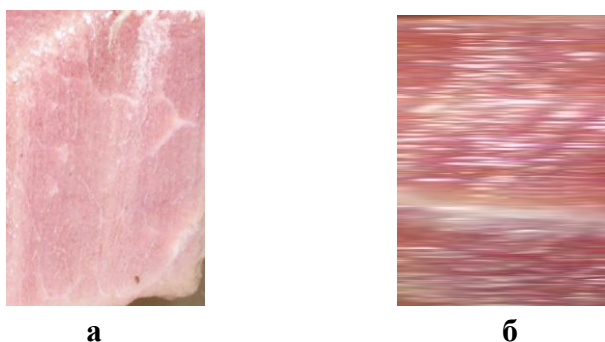


Рисунок 7 – Фотографии поверхностей разреза струями в замороженном свином мясе: а – водополимерная; б – водяная

Экспериментально установлено, что качество поверхностей разрезов в замороженных пищевых продуктах улучшается с увеличением скорости гидроструи, скорости реза до рационального значения $V_{п.рац}$ и ухудшается с увеличением диаметра сопла и при $V_{п} > V_{п.рац}$. Образующийся разрез в процессе гидрорезания пищевого продукта при очень низкой скорости реза ($V_{п} \ll V_{п.рац}$) имеет профиль А-образной формы, в то время как при высокой скорости реза ($V_{п} > V_{п.рац}$) профиль разреза приобретает слабо выраженную V-образную форму. Гидрорезание замороженного пищевого продукта со скоростью близкой к рациональному ее значению приводит к формированию разреза П-образной формы. Оценка качества боковых поверхностей разрезов замороженных пищевых продуктов производилась визуально и с помощью анализа профилограмм. Эксперимент показал (рисунок 7), что качество поверхности разрезов в замороженном пищевом продукте при его разрезании водополимерной струей существенно выше, чем при разрезании водяной и водообразивными струями.

Заключение

Показана перспективность технологии гидрорезания, особенно для резки пищевых продуктов, замороженных до -25°C и ниже. Решена важная для пищевой промышленности инженерная задача: предложены водосолевой, водоледающей, а также водополимерный способы интенсификации процесса гидрорезания замороженных пищевых продуктов. Доказана эффективность гидрорезания при использовании гидроабразивной струи, в которой в качестве абразива используются кристаллики льда или поваренной соли: глубина реза в пищевом продукте (мясе) при температуре -25°C увеличивается в 3–4 раза в сравнении с водяной струей. Понижение температуры водяной струи до -1°C дает скачкообразное увеличение (на 30 и 50% для давлений 150 и 50 МПа, соответственно) глубины реза в замороженном пищевом продукте.

Исследование влияния концентрации полиэтиленоксида (ПЭО) на глубину и производительность резания замороженных пищевых продуктов при -25°C водополимерной струей с давлением истечения 100 МПа и диаметром сопла $0,35 \cdot 10^{-3}$ м показало, что рациональная скорость реза возрастает более чем в 2 раза с увеличением концентрации ПЭО в воде и достигает максимума при 0,0013% для мол. массы ПЭО $6 \cdot 10^6$ и 0,007% для мол. массы $4 \cdot 10^6$.

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

Литература

1. *Proceedings of the 8th American Water Jet Conference*. Ed. Thomas J. Labus. Houston, Texas. August 26–29. 1995. Vol. II. 907 p.
2. Степанов Ю.С., Бурнашов М.А., Головин К.А. Прогрессивные технологии гидроструйного резания материалов. Тула: Изд-во Тул. гос. ун-та, 2009. 318 с.
3. Саленко О.Ф., Струтинский В.Б., Загирняк М.В. Эффективне гідрорізання. Кременчуг: КДПУ. 2005. 487 с.
4. Мурашов И.Д., Хвьяля С.И., Гиро Т.М. Инновационный метод разделки мяса высокоэнергетической гидроструей // *Аграрный научный журнал*. 2014. № 9. С. 43–46.
5. Коржов Е.Г. Некоторые особенности водоструйной обработки материалов «waterjet-технология» // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2006. № 3. С. 373–387.
6. Pogrebnyak A.V., Ivanyuta Yu.F. Peculiarities of polyethyleneoxide solution streaming through jet-shaping head while cutting foodstuffs // *Обладнання та технології харчових виробництв: темат. зб. наук. пр. Донецьк: Донец. держ. ун-т економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського*. 2014. Вип. 32. С. 50–59.
7. Погребняк А.В. Высокоэффективное гидрорезание твердых пищевых продуктов и материалов // *Управление реологическими свойствами пищевых продуктов: сб. докл. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та пищ. производств*. 2008. С. 173–179.
8. Погребняк А.В. Гидроструйная обработка пищевых продуктов // *Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності: тези доповідей*. Харків: ХДУХТ. 2015. С. 14–19.
9. Summers David A. *Waterjetting Technology*. Alden Press. Oxford. 1995, pp. 882–891.
10. Hashish M., Loscutoff M.V., Reich P. Cutting with Abrasive Waterjets. *2nd U.S. Water Jet Conference*. USA, 1983, pp. 391–405.
11. Baumann L., Boing R., Hessling M. Fundamental Investigations into the Improvement of Water Jet Performance by the Use of Abrasive Additives. *8th International Symposium on Jet Cutting Technology*. Durham: Cranfield, U.K., BHR Fluid Engineering Centre. 1986, pp. 277–285.
12. Hashish M. The waterjet as a tool. *14th International Conference on Jetting Technology*. Brugge: BHR Group Conference Series. Publication. 1998, № 32, pp. 1–3.
13. Eisenberg D., Kauzmann W. *The Structure and Properties of Water*. New York, Oxford: Oxford University. 1969, 261 p.
14. Pogrebnyak A.V., Ivanyuta Yu.F. Structure formation in polyethyleneoxide solution streaming through jet-shaping head while cutting foodstuffs // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств*. 2015. № 1(23). С. 138–141.
15. Deynichenko G. V., Pogrebnyak A. V., Ivanyuta Yu.F. The nature of increased cutting ability of a polyethylene oxide solution jet while processing food products // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств*. 2015. № 3(25). С. 6–13.
16. *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. Ed. Mark H. New York: John Wiley. 1967, V. 6, 818 p.

References

1. *Proceedings of the 8th American Water Jet Conference*. Ed. Thomas J. Labus. Houston, Texas. August 26–29. 1995. Vol. II. 907 p.
2. Stepanov Yu.S., Burnashov M.A., Golovin K.A. *Progressivnye tekhnologii gidrostruinogo rezaniya materialov* [Advanced of the technologies of hydrojet cutting of materials]. Tula, Tula State universitet Publ., 2009. 318 p.
3. Salenko O.F., Strutinskii V.B., Zagirnyak M.V. *Efektivne gidrorizannya* [Efficient of the waterjet cutting]. Kremenchug: Kremenchug State Polytechnic University Publ., 2005. 487 p.
4. Murashov I.D., Khvylya S.I., Giro T.M. Innovatsionnyi metod razdelki myasa vysokoenergeticheskoi gidrostruei [Innovative of the method of cutting meat high-gidrostroy]. *Agrarian Scientific Journal*. 2014, no. 9, pp. 43–46.
5. Korzhov E.G. Nekotorye osobennosti vodostruinoi obrabotki materialov «waterjet-tekhnologiya» [Some features of the water jet processing of materials water jet-technology]. *Mountain information and analytical bulletin*. 2006, no. 3, pp. 373–387.
6. Pogrebnyak A. V., Ivanyuta Yu. F. Peculiarities of polyethyleneoxide solution streaming through jet-shaping head while cutting foodstuffs. *Equipment and technology of food production*. Collection of scientific papers. Donetsk, DonNUET Publ., 2014, Issue 32, pp. 50–59.

7. Pogrebnyak A.V. Vysokoeffektivnoe gidrorezanie tverdykh pishchevykh produktov i materialov [Highly effective hydrocutting of firm foodstuff and materials]. *Control rheological properties of food*. Reports collection. Moscow, Moscow State University of food productions Publ., 2008. pp. 173–179.
8. Pogrebnyak A.V. Gidrostruinaya obrabotka pishchevykh produktov [The process of hydrocutting of food]. *Innovative aspects of development of the equipment of the food and hotel industry in the conditions of the present*. Abstracts of papers. Kharkiv, State university of food technology and trade Publ., 2015, pp. 14–19.
9. Summers David A. *Waterjetting Technology*. Alden Press. Oxford. 1995, pp. 882–891.
10. Hashish M., Loscutoff M.V., Reich P. Cutting with Abrasive Waterjets. *2nd U.S. Water Jet Confernce*. USA, 1983, pp. 391–405.
11. Baumann L., Boing R., Hessling M. Fundamental Investigations into the Improvement of Water Jet Performance by the Use of Abrasive Additives. *8th International Symposium on Jet Cutting Technology*. Durham: Cranfield, U.K., BHRA Fluid Engineering Centre. 1986, pp. 277–285.
12. Hashish M. The waterjet as a tool. *14th International Conference on Jetting Technology*. Brugge: BHR Group Conference Series. Publication. 1998, № 32, pp. 1–3.
13. Eisenberg D., Kauzmann W. *The Structure and Properties of Water*. New York, Oxsford: Oxford University. 1969, 261 p.
14. Pogrebnyak A.V., Ivanyuta Yu.F. Structure formation in polyethyleneoxide solution streaming through jet-shaping head while cutting foodstuffs. *Scientific journal NRU ITMO. Series: Processes and Food Production Equipment*. 2015, no. 1(23), pp. 138–141.
15. Deynichenko G.V., Pogrebnyak A.V., Ivanyuta Yu.F. The nature of increased cutting ability of a polyethylene oxide solution jet while processing food products. *Scientific journal NRU ITMO. Series: Processes and Food Production Equipment*. 2015, no. 3(25), pp. 6–13.
16. *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. Ed. Mark H. New York: John Wiley. 1967, V. 6, 818 p.

Статья поступила в редакцию 25.08.2016