

– суттєво поліпшують якісний рівень та результативність наукової діяльності університету, що сприяє створенню конкурентоспроможної наукової продукції та збільшенню грошових надходжень від її впровадження;

– розширюють форми співпраці співробітників університету з університетами та науковими установами України та інших держав, виробниками сільськогосподарської сировини та готової харчової продукції;

– сприяють оновленню системи наукового забезпечення, що надає можливість університету стати одним із провідних науково-освітніх центрів харчового профілю.

## **ГИДРОСТРУЙНАЯ ОБРАБОТКА ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ**

**Погребняк А.В.**, канд. техн. наук, доц.

Харьковский государственный университет питания и торговли

В качестве альтернативного способа разрезания пищевых продуктов, особенно при низких температурах, может стать гидроструйная обработка резанием, которая лишена многих недостатков традиционных методов. Главным препятствием для внедрения струйных технологий в пищевую промышленность является необходимость использования слишком высоких рабочих давлений, а следовательно, высокая стоимость оборудования.

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 как можно более 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 решить при разработке технологического процесса гидрорезания пищевых продуктов.

Целью работы является установление закономерностей процесса гидрорезания пищевых продуктов при изменении свойств гидроструи, необходимых для интенсификации данного процесса.

*Водоструйное резание.* Опыт применения водяных струй в качестве режущего инструмента для разрезания пищевых продуктов, полученный нами, показал практическую целесообразность их

использования. Экспериментальные результаты, характеризующие влияние скорости перемещения высокоскоростной водяной струи на глубину реза в блочном образце из филе хека, представлены в табл.1. Видно, что во всем исследованном интервале давлений от 150 до 300 МПа с увеличением скорости перемещения струи воды глубина реза быстро уменьшается. Практически важные глубины реза получаются на образцах замороженной рыбы до  $-3^{\circ}\text{C}$  только при относительно малых скоростях перемещения водяной струи от  $10^{-3}$  до  $10^{-2}$  м/с. Рассмотренные данные свидетельствуют, что понижение температуры пищевого продукта, в данном случае рыбы и рыбного фарша, до  $-25^{\circ}\text{C}$  и ниже исключает возможность использования водоструйной резки при давлениях меньше 200...300 МПа.

*Таблица 1 – Влияние скорости перемещения струи на глубину реза в блочных образцах из филе хека*

№ опыта	t, °C	$\Delta P_0$ , МПа	Глубина реза $h$ , $10^{-3}$ м					
			$V_n$ , $10^{-3}$ м/с					
			1	5	10	25	40	50
1	-3	150	76,4	47,1	36,1	9,2	6,25	2,3
2	-3	200	98,6	72,3	47,2	27,4	17,25	11,8
3	-3	250	127,2	105,7	84,1	64,1	40	21,7
4	-3	300	145,1	128,6	102,4	84,2	55	28,4

Также установлено, что значительная интенсификация процесса гидрорезания пищевых продуктов может достигаться за счет повышения качества изготовления поверхности струеформирующей головки и канала, подводящего рабочую жидкость к соплу, а также правильного выбора соотношения длины и диаметра ( $l_k/d_k$ ) подводящего канала.

Следует указать на важный отрицательный эффект, который возникает при высоких рабочих давлениях – существенное повышение температуры водяной струи из-за эффекта Джоуля–Томсона. Температура водяной струи при давлении 700 МПа может достигать  $100^{\circ}\text{C}$ . Повышение температуры водяной струи с ростом давления, с одной стороны, ограничивает использование высоких давлений, так как температура водяной струи не может превышать  $100^{\circ}\text{C}$ , а с другой – повышенная температура режущей струи неблагоприятно влияет на качество разрезаемого пищевого продукта.

Обобщенный анализ полученных нами экспериментальных данных с использованием методов теории подобия и размерностей, а

также методов теории вероятностей и математической статистики позволил получить расчетную зависимость в безразмерном виде для определения глубины реза ( $h$ ) в пищевом продукте с учетом его прочности на одноосное сжатие ( $\sigma_{сжс}$ ), оптимального ( $l_{онм}$ ) расстояния ( $l_o$ ) между срезом сопла и поверхностью пищевого продукта, диаметра сопла ( $d_o$ ), а также гидравлических ( $\Delta P_o$ ) и режимных параметров гидроструи ( $V_o$ ), скорости перемещения струи ( $V_n$ ) и качества её формирования (с учетом ранее полученной связи между  $l_{онм}$  и  $l_k$  – длиной подводящего канала,  $d_k$  – его диаметром,  $l_n$  – длиной начального участка струи) в следующем виде:

$$\frac{h}{d_o} = \frac{\Delta P_o}{\sigma_{сжс}} \cdot \left( \frac{l_o}{l_{онм}} \right)^{-0,25} \cdot \left( \frac{V_o}{V_n} \right)^{0,75} \cdot 10^{-2}. \quad (1)$$

Важной особенностью данного уравнения является то, что оно учитывает качество формирования гидроструи.

*Гидроабразивное резание.* Одним из методов повышения эффективности процесса гидрорезания является введение в режущую струю жидкости абразивных добавок (кварцевого песка). Это позволяет резать высокопрочные материалы при давлениях 300...500 МПа, обеспечивая при этом такую же производительность, что и при резке чистой водой с давлением истечения до 1000 МПа. В пищевой промышленности в качестве абразива можно применять поваренную соль и пищевую соду. Эксперимент показал, что при водосолевом и водосодовом гидроабразивном резании замороженного пищевого продукта наблюдается существенное увеличение эффективности процесса.

Однако использование соли или соды, в отличие, например, от кварцевого песка, осложняется тем, что они растворяются в воде, и чем выше температура воды, тем выше скорость их растворения, а эффективность – ниже. В данной ситуации перспективным может быть применение в качестве абразива частиц льда.

Экспериментальная проверка возможности использования водолеяной струи для гидрорезания замороженных пищевых продуктов подтвердила существенное увеличение эффективности процесса гидрорезания за счет использования водолеяной струи. Глубина щели, нарезаемая чистой водой в модельном образце пищевого продукта – льде, имеющем температуру  $-30^\circ \text{C}$ , составила ~30 см, а водолеяная струя прорезала образец толщиной 40 см насквозь.

Сделан вывод, что метод интенсификации процесса гидрорезания замороженного пищевого продукта путем введения в водяную струю мелких частиц льда достаточно эффективен, но использовать его в пищевой промышленности из экономических соображений нецелесообразно. Это объясняется прежде всего дорогостоящей технологией получения частичек льда.

*Гидрорезание при пониженных температурах струи.* С точки зрения экономической целесообразности более перспективным способом интенсификации процесса гидрорезания, чем водолеяной, оказался метод охлаждения струи.

Аномальная особенность фазовой диаграммы воды позволяет понижать температуру воды в ресивере гидрорежущей установки до  $-22,0^{\circ}\text{C}$  при рабочем давлении 207 МПа. Это позволяет получать переохлажденную водяную струю, в которой на выходе из сопла генерируются микрокристаллики льда. Полученный характер изменения глубины реза в замороженных рыбе и мясе при температуре водяной струи ниже  $0^{\circ}\text{C}$  убедительно доказал, что в водяной струе с момента её зарождения в воздушной среде происходит генерирование кристалликов льда, выполняющих роль абразива.

Предложен и реализован довольно оригинальный и эффективный метод, позволяющий получать низкие температуры струи без охлаждения воды в ресивере. Для этого в камеру смешивания водяной струи с абразивом подаются вместо абразива пары жидкого азота, под действием которых в струе образуются частички льда. Генерирование частичек льда в струе с использованием жидкого азота имеет ряд преимуществ по сравнению с методом их генерации путем охлаждения воды в ресивере. Анализ полученных экспериментальных результатов показывает, что повышение эффективности процесса гидрорезания пищевых продуктов водоазотным методом имеет практическую целесообразность.

Экспериментально было доказано, что давление воды при гидроабразивном (водосолевым, водосодовым и водоазотным) резании пищевого продукта составляет 30...45% от давления воды при резании водяной струей, а при одинаковом исходном давлении наблюдается увеличение глубины и скорости резания в несколько раз. Эти результаты позволили решить вопрос о физическом механизме взаимодействия гидроабразивной струи с пищевыми продуктами.

*Водополимерное резание.* К решению задачи повышения эффективности процесса гидрорезания можно подойти, используя для этого наблюдаемые «аномалии» при продольном течении растворов полимеров в их гидродинамическом и механохимическом поведении,

то есть использовать в качестве рабочей жидкости водные растворы полимеров. Полимер должен быть безопасным веществом и разрешенным для использования в пищевой промышленности. Таким полимером может быть полиэтиленоксид (ПЭО), имеющий класс опасности – 4 (безопасное вещество) и используемый в пищевой промышленности как загуститель, флокулянт и др.

Доказано, что глубина реза в пищевом продукте глубокого замораживания 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%. Наблюдается значительное (выходящее за пределы возможности установки) повышение рациональной скорости перемещения гидроструи относительно образца пищевого продукта за счет добавок в воду ПЭО.

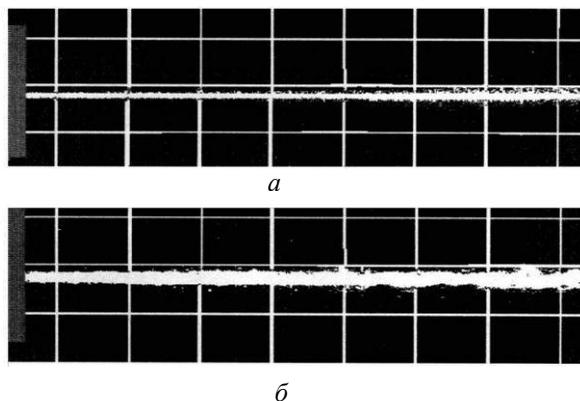
Данные табл. 2 свидетельствуют о том, что водополимерная струя обладает лучшими, чем водяная, гидродинамическими характеристиками. Если струя воды обеспечивает высококачественную нарезку щели в пищевом продукте при оптимальном расстоянии, то струя раствора полимера позволяет получить ту же глубину на расстоянии, которое в 15 раз больше.

**Таблица 2 – Влияние расстояния между поверхностью мяса и срезом сопла на ширину реза водополимерной и водяными струями ( $C_{\text{ПЭО}}=0,007\%$ ;  $\Delta P_0=100\text{МПа}$ ;  $d_0=0,35 \cdot 10^{-3}\text{м}$ )**

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

Также нами был решен вопрос о физическом поведении макромолекул в условиях растягивающего потока (течение через сопла) и выяснена природа генерируемых под воздействием продольного гидродинамического поля в растворах ПЭО структурных образований с довольно большими периодами их жизни. Одним из наиболее интересных и практически важных результатов этой работы является доказательство того, что возникновение «аномального» диссипативного режима течения растворов ПЭО при истечении их из сопел обусловлено реализацией высоких степеней (60% и выше) развернутости полимерных цепей. Поэтому выходящая из сопла водополимерная струя оказывается «армированной» сильно

развернутыми макромолекулярными цепями. Часть энергии струи идет на структурную перестройку потока, что и обуславливает снижение её средней скорости и увеличение компактности водополимерной струи. Последнее способствует увеличению глубины реза в замороженном пищевом продукте. То, что полимерные добавки увеличивают компактность высокоскоростной струи, видно из сравнительного анализа фотографий водяной и водополимерной струй, приведенных на рис.



**Рисунок – Фотографии струй водного раствора ПЭО и воды:  
а – раствор ПЭО;  $M_{ПЭО} = 4 \cdot 10^6$ ;  $C_{ПЭО} = 0,007\%$ ; б – вода**

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

Таким образом, экспериментальные данные свидетельствуют о том, что водополимерная струя обладает лучшими, чем водяная и водообразивные струи, гидродинамическими свойствами, обеспечивающими высокую производительность при высоком качестве поверхности разрезов в замороженном пищевом продукте.

Для разработки инновационного оборудования гидроструйной водополимерной обработки пищевых продуктов резанием необходимы дальнейшие исследования реофизического поведения растворов полимеров в условиях струеформирующей головки и механизма взаимодействия водополимерной струи с пищевыми продуктами.