

УДК 66.0

Математическая модель разделения мякотного и мясокостного сырья высокоэнергетической струей воды

Канд. техн. наук **Мурашов И.Д.** Murashov_45@mail.ru

Петраков С.А. Petrakov-s@yandex.ru

Журавлева Д.А. Darya_zh@mail.ru

Московский государственный университет пищевых производств
г.Москва, Волоколамское ш., 11, 125310

Исследование направлено на решение ряда фундаментальных научных проблем, возникших при разработке одного из самых сложных процессов разделения биоматериалов высокоэнергетической струей с абразивом в виде ледяной крошки. Данный процесс является комплексным и включает в себя ряд последовательных физических процессов. В этих процессах тесно переплетаются между собой механические, гидромеханические, теплообменные и массообменные процессы, сопровождаемые фазовыми переходами и меняющимися свойствами этих фаз. Подвергающиеся обработке биоматериалы обладают специфическими свойствами, а именно разработка математической модели процесса резания мяса и мясопродуктов высокой энергетической струей. Изучение влияния абразива пищевой соли на технологические параметры резания сырья с применением математического моделирования его разрушения гидроабразивной струей и влияния гидроабразивного резания на характер физико-химических и гистологических изменений мышечной ткани мясного сырья.

Ключевые слова: гидрорезка, лед, резание, давление, скорость.

Mathematical model of the separation of meat and bone meat raw materials high-energy water jets

Ph.D. **Murashov I.D.** Murashov_45@mail.ru

Petrakov S.A. Petrakov-s@yandex.ru, **Zhuravleva D.A.** Darya_zh@mail.ru

Moscow State University of Food Production, Moscow
Volokolamsk highway, 11, 125310

The research aims to address a number of fundamental scientific problems encountered in the development of one of the most difficult processes of separation of biomaterials with abrasive jet of high-energy in the form of crushed ice. This process is complex and involves a number of sequential physical processes. These processes are closely intertwined, mechanical, hydro, heat transfer and mass transfer processes accompanying the phase transition and changing properties of these phases. Are processed biomaterials have specific properties, namely the development of a mathematical model of the process of cutting meat and meat products of high energy jet. Study of the effect of dietary salt grit on the technological parameters of cutting materials with the use of mathematical modeling of its destruction and jet waterjet cutting Waterjet influence on the character of physico-chemical and histological changes in the muscle tissue of raw meat.

Key words: waterjet, ice, cutting, pressure, speed.

В научных источниках практически отсутствуют конкретные сведения по разрезанию мясных (свинных) полутуш и нарезки полуфабрикатов высокоэнергетической струей воды, и особенно струей с абразивом (в виде льда и поваренной соли). Неоднородность пищевых материалов, распространение зоны разрушения только на локальные микрообъемы, высокая скорость струи определяют сложности в исследованиях резки биологического сырья.

Разработка математической модели процесса резания биологического сырья (мякотного и мясокостного) высокоэнергетической струей предпринималась авторами [8], а нами было предложено совершенствование данной модели. [7], на основании чего было проведено исследование биологического сырья высокоэнергетической струей с абразивом на характер физико-химических и гистологических изменений в мышечной ткани. [8].

В [4] разработаны основы теории формирования трехфазной ледяной струи, что позволило выявить условия ее образования и исследовать показатели, обеспечивающие максимальную производительность резания при заданных параметрах точности и качества реза. Здесь же установлены закономерности влияния гидравлических, режимных и геометрических параметров технологического инструмента на производительность и режимы резания, обеспечивающие требуемые выходные параметры и показано, что применение водоледяной струи как режущего инструмента позволяет опустить рабочее давление струи и снизить энергоемкость оборудования.

Элементы теории резания мясного сырья гидравлической струей в первом приближении могут быть разработаны при рассмотрении действия возможных усилий на струю по аналогии и с учетом следующих допущений (Карпов В.И. [6]), принимаемых для процесса резания мяса ножом:

- силы сопротивления имеют постоянную величину;
- разрезаемый материал имеет однородное строение;
- скорость подачи постоянная;
- работа движущей силы (скоростной напор) расходуется только на преодоление сил сопротивления;
- прилегающие к граням струи слои материала при резании перемещаются в перпендикулярном направлении по отношению к оси ножа;
- материал обладает упругими свойствами;
- трение струи о разрезаемый материал подчиняется соответствующим зависимостям, принятым в гидравлике.

Суммарная необходимая движущая сила струи может быть найдена с помощью теоремы об изменении кинетической энергии материальной точки, принадлежащей режущему (фронтальному) сечению струи. Удельная движущая сила зависит от:

- удельной силы резания;
- физико-механических свойств разрезаемого материала;
- скорости резания;
- глубины проникновения струи в материал;
- длины деформируемого материала;
- геометрических параметров струи (толщина, угол раскрытия);
- трения струи о разрезаемый материал.

Процесс резания начинается с момента, когда фактические напряжения на режущей кромке струи превысят предельные значения для данного разрезаемого материала. Фактические напряжения на режущей кромке определить очень сложно, т.к. свойства разрезаемых материалов существенно отличаются и невозможно точно определить истинную площадь контакта режущей и разрезаемой сред. Между чистотой среза и удельным усилием резания, как правило, наблюдается следующая взаимозависимость: повышение качества (чистоты) поверхности среза при уменьшении усилия и при

увеличении скорости резания. Сила, необходимая для разрезания мясного сырья, определяется из условия равновесия «клина», к которому приложены:

- движущая сила;
- силы упругости разрезаемого материала, действующие на наклонные грани струи;
- силы трения;
- силы, приложенные к режущей кромке струи.

Последние, по экспериментальным данным [11], предположительно можно считать постоянными (не зависящими от угла раскрытия струи и скорости резания).

В.И. Карповым [6] при экспериментальном исследовании основных физических параметров резания мяса были получены следующие результаты:

- мышечные ткани мяса ведут себя как упругое тело, подчиняясь закону Гука до момента, когда величина мгновенно действующих напряжений не превышает предела упругости;
- удельные усилия резания составляют: для мяса при резке поперек его волокон - (2-4) Н/м²; то же вдоль волокон – (1-2,7) Н/м²; для кожи - (4-24) Н/м²; для кости (позвонков) – (100-400) Н/м²;

В настоящее время зависимость удельной работы сил резания от скорости резания, температуры материала, геометрических параметров режущей струи изучена недостаточно. В литературе практически не встречается работ по исследованию качества поверхности среза и влиянию на нее различных факторов.

На энергозатраты при резании влияют следующие факторы:

- толщина струи;
- величина заглубления струи;
- параметры распыла струи, в т.ч. угол ее раскрытия;
- толщина разрезаемого образца;
- скорость резания и подача инструмента;
- удельное сопротивление резанию (удельная работа резания);
- трение разрезаемого материала о поверхность струи;
- показатели упругости разрезаемого материала.

По аналогии с работой И.В. Крагельского [12] следует рассматривать пять видов фрикционной связи разрезаемого материала и струи:

- скол или срез материала;
- пластическое оттеснение;
- упругое деформирование;
- адгезионное разрушение;
- когезионное разрушение.

В общем случае в процессе взаимодействия двух сред в различных точках контакта могут одновременно иметь место все пять видов фрикционной связи. Обычно используются две составляющие силы трения: адгезионная и деформационная.

Скорость резания влияет на количественные параметры процесса: усилие, работу, мощность, а также качество реза.

Процесс гидрорезания возможен в случае, когда давление струи жидкости на единицу площади поверхности реза превышает предел прочности обрабатываемого материала. При равных условиях дальнейшее повышение давления истекающей струи жидкости (из-за возрастания ее кинетической энергии) приведет к увеличению толщины разрезаемого материала за один проход [3].

Давление p_c и сила R_n , которые создаются струей рабочей жидкости на поверхности контакта с обрабатываемым материалом, определяются по формулам [2,10]:

$$p_c = (0,5 + e) \cdot 10^{-6} \cdot r \cdot V_c^2, \text{ Па} \quad (1)$$

$$R_n = (0,5 + e) \cdot 10^{-6} \cdot r \cdot j \cdot f_c \cdot V_c^2, \text{ Н} \quad (2)$$

Где:

- e - коэффициент сжатия струи, зависящий от профиля отверстия сопла (при коноидном профиле $e > 1$);
- r - плотность рабочей жидкости;
- $V_c = V_c(p_c)$ - скорость струи рабочей жидкости, вытекающей из сопла (скорость резания);
- j - коэффициент, учитывающий эффект растекания и изменение скорости струи по мере ее удаления от сопла ($j = 0,92 \div 0,96$);
- f_c - площадь поперечного сечения выходного отверстия сопла.

Для определения V_c используется формула, основанная на данных о сжимаемости жидкости в предположении, что плотность всех точек струи неизменна и равна плотности используемой воды, а коэффициент изменения скорости $j=1$ (Л.Ф. Верещагин [45]):

$$V_c = 44 \sqrt{p_c} \quad (3)$$

Там же даны зависимости, первая из которых может быть использована для определения максимальных значений силы воздействия струи на преграду (R_{max}) при различных параметрах истечения, полученная в результате математической обработки экспериментальных данных:

$$R_{max} = \left(\frac{p}{100}\right)^{1,15} \cdot d_c^{1,75}, \text{ Н} \quad (4)$$

А вторая получена в результате исследований для определения влияния различных технологических параметров на силу резания R_p :

$$R_p = 162 \cdot \left(\frac{p}{100}\right)^{-1,27} \cdot d_c^{2,05} \cdot h^{1,1} \cdot \left(\frac{\sigma_p}{100}\right)^{0,5} \cdot S^{0,93} \quad (5)$$

Где:

- d_c - диаметр отверстия сопла, мм;
- h - толщина разрезаемого материала, мм;
- σ_p - предел прочности материала на растяжение, МПа;
- S - подача, см/с.

Форма и диаметр выходного отверстия сопла оказывают влияние на качество водяной струи и ее компактность. Из формулы (7) видно, что при равных условиях работы увеличение f_c и, следовательно, диаметра выходного сечения сопла приводит к возрастанию R_n . Это обстоятельство позволяет констатировать, что при заданных условиях работы за счет увеличения диаметра выходного отверстия сопла можно резать и более толстые материалы, но в этом случае площадь контакта струи с материалом возрастает и увеличенная R_n воздействует на большую площадь и давление на единицу площади не изменится. Увеличение диаметра сопла приводит к повышенному расходу рабочей жидкости и, следовательно, к возрастанию энергетических затрат на формирование струи.

Обычно наибольший диаметр сопла при резании материалов не превышает 0,3-0,5 мм [3].

Изменение диаметра отверстия сопла в меньшую сторону приводит к формированию струи с

меньшим диаметром истечения, а ниже 0,05 мм - к распылению струи. Давление p_c и сила R_n , которые создаются струей рабочей жидкости на поверхности контакта с обрабатываемым материалом, определяются по формулам [40]:

$$p_c = (0,5 + e) \cdot 10^{-6} \cdot r \cdot V_c^2, \text{ Па} \quad (6)$$

$$R_n = (0,5 + e) \cdot 10^{-6} \cdot r \cdot j \cdot f_c \cdot V_c^2, \text{ Н} \quad (7)$$

Где:

- e - коэффициент сжатия струи, зависящий от профиля отверстия сопла (при коноидном профиле $e > 1$);
- r - плотность рабочей жидкости;
- $V_c = V_c(p_c)$ - скорость струи рабочей жидкости, вытекающей из сопла (скорость резания);
- j - коэффициент, учитывающий эффект растекания и изменение скорости струи по мере ее удаления от сопла ($j = 0,92 \div 0,96$);
- f_c - площадь поперечного сечения выходного отверстия сопла.

Для определения V_c используется формула, основанная на данных о сжимаемости жидкости в предположении, что плотность всех точек струи неизменна и равна плотности используемой воды, а коэффициент изменения скорости $j=1$ (Л.Ф. Верещагин [5]):

$$V_c = 44\sqrt{p_c} \quad (8)$$

Там же даны зависимости, первая из которых может быть использована для определения максимальных значений силы воздействия струи на преграду (R_{max}) при различных параметрах истечения, полученная в результате математической обработки экспериментальных данных:

$$R_{max} = \left(\frac{p}{100}\right)^{1,15} \cdot d_c^{1,75}, \text{ Н} \quad (9)$$

А вторая получена в результате исследований для определения влияния различных технологических параметров на силу резания R_p :

$$R_p = 162 \cdot \left(\frac{p}{100}\right)^{-1,27} \cdot d_c^{2,05} \cdot h^{1,1} \cdot \left(\frac{\sigma_p}{100}\right)^{0,5} \cdot S^{0,93} \quad (10)$$

Где:

d_c - диаметр отверстия сопла, мм;

h - толщина разрезаемого материала, мм;

σ_p - предел прочности материала на растяжение, МПа;

S - подача, см/с.

Форма и диаметр выходного отверстия сопла оказывают влияние на качество водяной струи и ее компактность. Из формулы (7) видно, что при равных условиях работы увеличение f_c и, следовательно, диаметра выходного сечения сопла приводит к возрастанию R_n . Это обстоятельство позволяет констатировать, что при заданных условиях работы за счет увеличения диаметра выходного отверстия сопла можно резать и более толстые материалы, но в этом случае площадь контакта струи с материалом возрастает и увеличенная R_n воздействует на большую площадь и давление на единицу

площади не изменится. Увеличение диаметра сопла приводит к повышенному расходу рабочей жидкости и, следовательно, к возрастанию энергетических затрат на формирование струи. Обычно наибольший диаметр сопла при резании материалов не превышает 0,3-0,5 мм [3]. Изменение диаметра отверстия сопла в меньшую сторону приводит к формированию струи с меньшим диаметром истечения, а ниже 0,05 мм - к распылению струи.

Для пищевых продуктов одним из наиболее перспективных и эффективных вариантов гидроабразивной резки является использование водоледяной струи, добавление в водяную струю частиц «крошеного» льда обеспечивает повышение производительности разрезания биологического сырья по сравнению со струей чистой воды в 3-5 раз.

Поскольку водоледяные струи являются трехфазными (жидкость - твердые ледяные частицы - газ), физические процессы, сопровождающие их формирование и определяющие их свойства. Физико-механические свойства льда обуславливаются как атомно-молекулярными, в частности, водородными связями, так и надмолекулярной структурой и характером деформации. Особенности льда является его пластичность, связанная, в частности, с перекристаллизацией. Для расчета пластической деформации льда существуют методики, позволяющие судить о долговременной деформативной прочности льда [13].

Лед не следует в точности ни закону упругости, ни закону вязкости. По этой и другим причинам прочность льда (предел прочности или разрушающее напряжение) является условной величиной. В качестве простейшей механической модели льда обычно принимается условное тело Максвелла, описываемое в интерпретации Паундера уравнением:

$$\varepsilon_d = \frac{\sigma}{n} \sin \omega \tau + \frac{\sigma}{\omega \beta} (1 - \cos \omega \tau) \quad (11)$$

Где:

ε_d - общая деформация льда;

σ - напряжение;

n - упругая деформация;

ω - циклическая частота воздействия;

τ - время;

β - коэффициент вязкости.

Слагаемые уравнения отражают частные деформации: первое - упругую, второе - пластическую.

Различают три вида льдообразования:

- внутриводное - кристаллы, образуются внутри переохлажденной массы воды;

- доплечное - образование на охлаждаемой поверхности щетки (сетки) из отдельных, еще не смерзшихся в пленку кристаллов;

- пленочным - нарастание на охлаждаемой ледяной подложке сплошной пленки из кристаллов.

Все виды льдообразования обычно развиваются одновременно.

Время образования внутриводного льда (критериальное уравнение Кутателадзе, относящееся к случаю продолговатых кристаллов льда и преобладания конвективной теплоотдачи:

$$\tau = \frac{k_{\text{л}} \rho_{\text{л}} d_1^2}{\rho_{\text{в}} a} \cdot \frac{\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^{3/2} - 1}{2Pr^{1/3} Re^{1/2}} \quad (12)$$

Где:

- $\rho_{\text{в}}$ и $\rho_{\text{л}}$ - плотность воды и льда;
- a - коэффициент температуропроводности;
- Pr и Re - критерии Прандтля и Рейнольдса;
- d_1 и d_2 - начальный и конечный диаметры кристалла.

Объемная скорость роста кристалла для случая образования внутриводного льда:

$$v = (14 + \omega)t_{\text{п}}^{1,62} \quad (13)$$

Где:

- ω - скорость движения воды;
- $t_{\text{п}}$, °C - абсолютное значение температуры переохлаждения воды.

Разрезание мясного сырья включает в себя целый ряд сложных физических процессов, основными из которых являются: удар, внедрение и движение частиц льда вдоль поверхности взаимодействия, нагрев частиц льда, сопровождающийся таянием (обратным фазовым переходом - ОФП). В связи с этим, представляется целесообразным рассмотреть процесс *единичного взаимодействия частицы льда с разрезаемым материалом* и последующего обобщения полученных результатов на весь поток с целью определения производительности процесса резания.

Как правило, мясное сырье обладает низкой способностью к теплопереносу, поэтому температурой, определяющей их механические и теплофизические свойства, является температура контактной поверхности «частица льда – материал». Ниже представлена система уравнений, описывающих движение частиц льда в мясном сырье.

$$m(t) \frac{dV}{dt} = -\frac{1}{2} C_x \rho_{\text{см}3}(T) S(h) V^2(t) * - \sigma_{\text{соот}}(t) S(h) ** - F_{\text{тр}}(t, \varphi) ***; \quad (14)$$

- $m(t)$ - текущее значение массы частицы льда с учетом ОФП на контактирующей поверхности;
- $V(t)$ - текущее значение скорости проникания;
- C_x - коэффициент лобового сопротивления частицы льда;

$$S(h, \varphi) = \pi R_{\text{л}}^2(t, \varphi) \cdot \left[\frac{h(t)}{R_{\text{л}}(t, \varphi)} H(R_{\text{л}} - h) + H(h - R_{\text{л}}) \right] \quad (15)$$

текущее значение проекции площади сечения частицы льда с учетом глубины проникания и наличия ОФП на элементарной площадке в пределах телесного угла $\Delta\varphi$;

- $h(t)$, $R_{\text{л}}(t)$ - функции глубины проникания и текущего радиуса частицы льда с учетом ОФП соответственно;
- $H(R_{\text{л}}-h), H(h-R_{\text{л}})$ - функция Хевисайда [9].
- * - 1ое слагаемое правой части формулы (14) – характеризует потерю кинетической энергии ледяной частицы при взаимодействии с материалом;
- ** - то же 2ое слагаемое - отражает сопротивление материала разрушающему воздействию;
- *** - то же 3е слагаемое – учитывает силу трения, действующую на частицу в прорезаемом материале.

В данной работе представлено математическое обоснование модели разделения водоледяной

струей биологического сырья.

Использование высокоэнергетической струи воды с абразивом (льда, пищевой соли) имеет неоспоримое значение в пищевой промышленности перед традиционными методами разделения сырья.

Благодаря своим качествам - простоте метода, точности, универсальности и дешевизне - прогрессивная технология гидрорезания находит широкое применение везде, где требуется быстрая и точная обработка самых разнообразных материалов.

Список литературы

1. *Абрамзон Л.С. Гидравлика. Истечение жидкостей через отверстия и насадки. Гидравлические струи. Динамическое воздействие струи на преграду. Уч. пособие. Уфа: УНИ, 1981. - 81с.*

2. *Афанасов Э.Э., Николаев Н.С., Rogov И.А. Аналитические методы описания технологических процессов мясной промышленности. М., 2003. - 184с.*

3. *Барсуков Г.В. Управление системой технологического обеспечения качества поверхности деталей в процессе резания сверхзвуковой струей жидкости // Справочник. Инженерный журнал. Приложение. Современные проблемы технологии машиностроения, 2003-№8.*

4. *Бурнашов М.А. Повышение эффективности разрезания листовых неметаллических материалов водоледяными струями высокого давления. Дис. докт. техн. наук. Орел, 2010.*

5. *Верещагин Л.Ф., Семерчан А.А. К вопросу о распаде высокоскоростных водяных струй. ЖГФ, 1959, т.29, №1, - С.45-50.*

6. *Карнов В.И. Силы полезных сопротивлений, возникающие при резании рыбного сырья. Калининград: изд-во Калининградская Правда, 1971. - 65с.*

7. *Мурашов И.Д., Петраков С.А. Применение технологии гидрорезания в процессе разделения мясного сырья, как эффективного и перспективного режущего инструмента // МГУ пищевых производств, 2011.*

8. *Мурашов И.Д., Петраков С.А. Лед как абразив при разделении мясного сырья высокоэнергетической струей. Влияние количества абразива в гидроабразивной струе на скорость резания // МГУ пищевых производств, 2011.*

9. *Михайлов А.В., Сладков В.Ю., Чуков А.Н. Математическое моделирование процесса двухконтактного гидроразрушения упругопластичных материалов. // 7 Сб. Известия ТулГУ.— Тула.2000,— Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности. — Вып. 6,*

10. *Погребняк А.В. Повышение эффективности процесса гидрорезания пищевых продуктов глубокой заморозки путем модификации рабочей жидкости. / Научно-техническая конференция: 25 симпозиум по реологии. Осташков, 5-7 сентября 2010. // Институт нефтехимического синтеза РАН. - С.170-172.*

11. *Предтеченский Н.А. Механическое оборудование предприятий общественного питания. М.: Экономика, 1966. - 528с.*

12. <http://tricotage.ru/materialovedenie-v-proizvodstve-izdelii-legkoi-promyshltnnosti-str86.html>

13. *Н. Liu, t. Butler A vanishing abrasive cryogenic jet for airframe repainting// Processing of the new applications of water jet technology. Isinomaki, Japan, 1999. – pp. 51 – 60.*

References

1. Abramzon L.S. *Gidravlika. The expiration of liquids through openings and nozzles. Hydraulic streams. Dynamic impact of a stream on a barrier* Uch. posobie. Ufa: UNI, 1981. - 81s.
2. Afanasov E.E., Nikolaev N.S., Rogov I.A. *Analytical methods of the description of technological processes of the meat industry.* M., 2003. - 184s.
3. Barsukov G.V. Management of technological support of system qualities of a surface of details in the course of cutting by a supersonic stream liquids // *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal. Prilozhenie. Sovremennye problemy tekhnologii mashinostroeniya*, 2003- №8.
4. Burnashov M.A. Increase of efficiency of cutting sheet neme-tallicheskih of materials water ice streams of a high pressure. *Dis. dokt. tekhn. nauk.* Orel, 2010.
5. Vereshchagin L.F., Semerchan A.A. To a question of disintegration of high-speed water streams. *ZhGF*, 1959, t.29, №1, - S.45-50.
6. Karpov V.I. Forces of useful resistance arising when cutting fish raw materials. *Kaliningrad: izd-vo Kaliningradskaya Pravda*, 1971. - 65s.
7. Murashov I.D., Petrakov S.A. Application of technology of hydrocutting in the course of division of meat raw materials, as effective and the perspective cutting tool // *MGU pishchevykh proizvodstv*, 2011.
8. Murashov I.D., Petrakov S.A. Led as an abrasive at division of meat raw materials a high-energy stream. Influence of quantity of an abrasive in a hydroabrasive stream on cutting speed// *MGU pishchevykh proizvodstv*, 2011.
9. Mikhailov A.V., Sladkov V.Yu., Chukov A.N. Mathematical modeling of process of two-contact hydrodestruction of elastoplastic materials // *7 Sb. Izvestiya TulGU.— Tula.2000,— Ser. Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti .—Vyp. 6,*
10. Pogrebnyak A.V. Increase of efficiency of process of hydrocutting of foodstuff of a deep freezing by modification of working liquid / *Nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya: 25 simpozium po reologii. Ostashkov, 5-7 sentyabrya 2010. // Institut neftekhimicheskogo sinteza RAN.* - S.170-172.
11. Predtechenskii N.A. *Mechanical equipment of catering establishments.* M.: Ekonomika, 1966. - 528s.
12. <http://tricotage.ru/materialovedenie-v-proizvodstve-izdelii-legkoi-promyshltnnosti-str86.html>
13. H. Liu, t. Butler A vanishing abrasive cryogenic jet for airframe repainting// *Processing of the new applications of water jet technology.* Isinomaki, Japan, 1999. – pp. 51 – 60.