

УДК 637.531.45; 658.567

[https://doi.org/10.47612/2073-4794-2022-15-2\(56\)-45-55](https://doi.org/10.47612/2073-4794-2022-15-2(56)-45-55)

Поступила в редакцию 27.04.2022

Received 27.04.2022

**В. Я. Груданов, А. А. Бренч, А. Б. Торган, И. Е. Дацук, С. А. Зеленко,  
В. В. Василевская**

*Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»,  
г. Минск, Республика Беларусь*

## **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА И ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МЯСНОГО СЫРЬЯ НА ЭМУЛЬСИТАТОРАХ**

**Аннотация.** Измельчение различных материалов осуществляется различными способами: резанием, раздавливанием, распиливанием, разламыванием, ударом.

В технологическом оборудовании мясокомбинатов измельчение достигается сочетанием нескольких видов механического воздействия. Каждый вид измельчения характеризуется средним размером частиц, при этом применяется крупное, среднее, мелкое, тонкое, сверхтонкое (коллоидный размол) измельчение.

Составлена структурная схема измельчения мяса и мясных продуктов, которая раскрывает сущность происходящих процессов и служит основой для обоснования совершенствования и создания новых рабочих органов машин для более эффективного измельчения мяса. Изложены основные закономерности процесса скользящего резания, построена математическая модель движения мясного сырья в цилиндрических каналах ножевой решетки. Получены аналитические уравнения, позволяющие определить продолжительность измельчения от объема готовой продукции. Разработана математическая модель ножевой решетки эмульсификатора при концентрическом расположении отверстий. Модель позволяет получить одинаковую проходную способность рабочей поверхности решетки в горизонтальной плоскости. В данной модели используются закономерности теории предпочтительных чисел.

**Ключевые слова:** эмульсификатор, ножевая решетка, измельчение, скорость движения, коэффициент скольжения, угол скольжения, дифференциальные уравнения, скорость процесса, числа Фибоначчи, пропускная способность.

**V. Ya. Grudanov, A. A. Brench, A. B. Torgan, I. E. Datsuk, S. A. Zelenko, V. V. Vasilevskaya**

*Educational institution “Belarusian State Agrarian Technical University”, Minsk, Republic of Belarus*

## **THEORETICAL FOUNDATIONS OF IMPROVING THE QUALITY AND EFFICIENCY OF THE PROCESS OF FINE GRINDING OF MEAT RAW MATERIALS ON EMULSIFIERS**

**Abstract.** Grinding of various materials is carried out in various ways: cutting, crushing, sawing, breaking, hitting.

In the technological equipment of meat processing plants, grinding is achieved by a combination of several types of mechanical action. Each type of grinding is characterized by an average particle size, while large, medium, fine, fine, ultrafine (colloidal grinding) grinding is used.

A block diagram of meat and meat products grinding has been compiled, which reveals the essence of the processes taking place and serves as the basis for justifying the improvement and creation of new working bodies of machines for more efficient meat grinding. The basic laws of the sliding cutting process are described, a mathematical model of the movement of meat raw materials in cylindrical channels of the knife grate is constructed. Analytical equations are obtained to determine the duration of grinding from the volume of finished products. A mathematical model of the knife grid of the emulsifier with a concentric arrangement of holes has been developed. The model allows you to get the same throughput capacity of the working surface of the grid in the horizontal plane. This model uses the regularities of the theory of preferred numbers.

**Keywords:** emulsifier, knife grating, grinding, movement speed, sliding coefficient, sliding angle, differential equations, process speed, Fibonacci numbers, throughput.

**Ведение.** В настоящее время на современном крупном мясоперерабатывающем предприятии используется более 400 единиц технологического оборудования и комплексных агрегатов. Основная часть их предназначена для измельчения различного вида сырья: от туш животных до приготовления фаршей. Операции, связанные с измельчением в мясной промышленности, составляют более 70%. Они широко используются при производстве основных видов продукции: колбас, полуфабрикатов, консервов, пищевых животных жиров, а также технической продукции: кормов, клея и др. Измельчение различных материалов, как установлено в настоящее время, осуществляется различными способами: резанием, раздавливанием, распиливанием, разламыванием, истиранием, ударом. Все способы, а чаще всего их комбинации составляют основу процесса дробления.

В технологическом оборудовании мясокомбинатов измельчение достигается сочетанием нескольких видов механического воздействия. Его выбор определяется физико-механическими свойствами измельчаемого материала (прочность, упругость, пластичность, вязкость, мягкость и др.) и желательными характеристиками определенных процессов, особенно важен размер измельчаемого материала. [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7].

По назначению технологическое оборудование предприятий можно разделить на две основные группы:

оборудование для измельчения твердого сырья (костного, мясокостного, блочного мороженого, специй и пряностей) — силовые измельчители, дробилки, волчки-дробилки, измельчители мороженных блоков, костей, специй и пряностей;

оборудование для измельчения мясного сырья (мышечной, жировой и соединительной ткани в размороженном состоянии) — волчки, шпигорезки, куттера, коллоидные мельницы, эмульсаторы.

**Цель работы** — повышение качества и эффективности процесса тонкого измельчения мясного сырья на эмульсаторах.

**Предварительные сведения.** По степени измельчения действующее на мясоперерабатывающих предприятиях оборудование можно разделить на машины для крупного, среднего, мелкого, тонкого и сверхтонкого измельчения. Каждый вид измельчения характеризуется средним размером частиц (табл. 1).

Таблица 1. Вид измельчения и размер частиц мяса  
Table 1. Type of grinding and size of meat particles

Вид измельчения	Средний размер частиц, мм	
	до измельчения	после измельчения
Крупное	До 300	До 100
Среднее	До 200	60-10
Мелкое	200-100	10-2
Тонкое	10-2	2-0,4
Сверхтонкое (коллоидный размол)	10-0,4	$75 \cdot 10^{-3}$ - $1 \cdot 10^{-3}$

Вид измельчения зависит от способов воздействия режущего механизма на исходный материал. В частности, известно, что наиболее пригодным для измельчения мяса оказались резание и распиливание, что реализовано в машинах для крупного измельчения, сочетания резания с раздавливанием, раскалыванием и ударом (машины для среднего и мелкого измельчения), для тонкого и сверхтонкого измельчения характерно воздействие резанием, раздавливанием и истиранием. Соответственно механизмам воздействия разрабатываются и изготавливаются режущие инструменты, которые в своей конструкции должны сочетать конкретные типы воздействий. При этом следует учитывать и то, что мелкое, тонкое и сверхтонкое измельчения характеризуются преимущественно дроблением и конечная цель операции — получение гомогенной массы, обладающей определенными структурно механическими свойствами, отличающимися ее от исходного сырья. [8, 9, 10,11].

Режимы резания мяса в настоящее время хорошо изучены в трудах Пелеева А.И., Ивашова В.И., Чижиковой Т.В., Клименко М.Н., Ануфриева В. В., Большакова А. С., Пугачева П. И. и многих зарубежных исследователей. Установлено, что усилия резания уменьшаются с увеличением скорости резания. Считается, что при увеличении скорости резания возрастает качество среза, однако при этом отмечается повышение температуры в зоне резания, что может сопровождаться денатурацией белков и снижением биологической ценности продукции. Эффективность измельчения в значительной степени зависит от конструктивных и геометрических параметров инструмента и режимов процесса. От динамических и кинематических характеристик системы машина — режущий инструмент — сырье зависят качество и физико-механические свойства конечной продукции. Общая

схема процесса измельчения мяса и мясных продуктов, учитывающая различные факторы, представлена на рис. 1



Рис. 1. Структурная схема измельчения мяса и мясных продуктов  
Fig. 1. Block diagram of meat and meat products grinding

Данная структурная схема измельчения мяса и мясопродуктов раскрывает сущность происходящих процессов и служит основой для обоснования совершенствования и создания новых рабочих органов машин для более эффективного измельчения мяса [10, 22, 19].

**Основные закономерности процесса скользящего резания.** В зависимости от характера относительного перемещения режущего инструмента и продукта и направления этого перемещения резание принято подразделять на рубящие и скользящие. [14, 15, 16].

В отличие от рубящего резания при скользящем резании для разрезания продукта требуются меньшие уплотнения и усилия, так как перерезание продукта осуществляется отдельными микрозубчиками, причем суммарная длина микрозубчиков, одновременно участвующих в разрезании продукта, всегда меньше длины режущей кромки лезвия.

Поэтому при скользящем резании величина контактных напряжений, необходимая для разрезания продукта, а, следовательно, и требуемое усилие, значительно меньшее, чем при рубящем резании, при этом поверхности среза получаются более гладкими и ровными, а сам продукт подвержен меньшему силовому воздействию со стороны режущего инструмента.

При скользящем резании продукт значительно меньше деформируется, твердые продукты не крошатся и не утрачивают своей ценности, сочные продукты не теряют сока, а их ломтики не разваливаются и не деформируются.

Скорость  $v$  любой точки ножа относительно продукта может быть представлена векторной суммой двух скоростей:

- ♦  $v_n$ , направленной по нормали к режущей кромки лезвия;
- ♦  $v_t$ , направленной по касательной к режущей кромки лезвия.

Абсолютная величина скорости:

$$v = \sqrt{v_n^2 + v_t^2}. \quad (1)$$

Угол  $\beta$ , заключенный между параллелью к режущей кромке и скоростью относительно продукта, называется углом скольжения.

Тангенс угла скольжения называется коэффициентом скольжения  $K_\beta$ , который численно равен отношению касательной скорости  $v_t$  к нормальной  $v_n$ .

$$K_{\beta} = \operatorname{tg}\beta = \frac{v_{\tau}}{v_n} \quad (2)$$

Коэффициент скольжения может принимать числовые значения от нуля до  $\infty$ . При  $K_{\beta} = 0$  имеет место рубящее резание, при  $K_{\beta} = \infty$  режущий инструмент совершает скользящее движение вдоль продукта, не разрезая его. При скользящем резании с увеличением коэффициента скольжения  $K_{\beta}$  величина общего усилия, действующая на инструмент, а также нормальная составляющая этого усилия, от которых в большей степени зависит деформация продукта при резании, уменьшаются, что способствует более качественному измельчению продукта.

$$v_n = \omega r \cos\beta; \quad (3)$$

$$v_{\tau} = \omega r \sin\beta. \quad (4)$$

При использовании вращающегося ножа с прямолинейной режущей кромкой лезвия, расположенной под углом к радиусу (рис. 2), линейная скорость  $v$  произвольной точки  $A$  равна  $v = \omega r$  и направлена перпендикулярно к радиусу. Нормальная  $v_n$  и касательная  $v_{\tau}$  составляющие этой скорости соответственно равны.

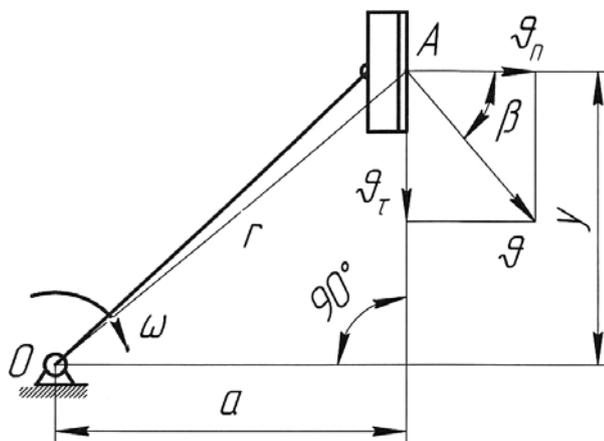


Рис. 2. Схема определения коэффициента скольжения по длине режущей кромки  
 A — произвольная точка;  $v$  — линейная скорость произвольной точки A;  $v_n$  — нормальная составляющая линейной скорости;  $v_{\tau}$  — касательная составляющая линейной скорости;  $\omega$  — угловая скорость вращения ножа;  $\beta$  — угол скольжения; O — ось вращения ножа;  $r$  — радиус вращения точки A

Fig. 2. Scheme of determination of coefficient of friction on length of the cutting edge  
 A — arbitrary point,  $v$  — linear velocity of an arbitrary point A;  $v_n$  — normal component of the linear velocity;  $v_{\tau}$  — tangential component of the linear velocity,  $\omega$  — angular velocity of rotation of the knife;  $\beta$  — angle of slide; O — axis of rotation of the knife;  $r$  — radius of rotation of point A

Из рис. 2. следует:

$$K_{\beta} = \frac{v_{\tau}}{v_n} = \operatorname{tg}\beta = \frac{a}{y}, \quad (5)$$

где  $a$  — наименьшее расстояние от центра вращения до режущей кромки лезвия или ее продолжение;  $y$  — расстояние от рассматриваемой точки A до перемещения режущей кромки с опущенным на нее перпендикуляром из центра вращения.

Расчеты показывают, что при постоянном значении  $a$  коэффициент скольжения  $K_{\beta}$  изменяется по длине лезвия в зависимости от  $y$  по закону гиперболы.

В точке Б ( $y = 0$ ) нормальная составляющая скорости  $v_n = 0$ ,  $K_{\beta} = \infty$ , т.е. резания не будет. При увеличении  $y$   $K_{\beta}$  уменьшается. При  $y = \operatorname{const}$   $K_{\beta}$  возрастает с увеличением  $a$ . Если  $a = 0$ , режущая кромка лезвия совпадает с радиусом,  $K_{\beta} = 0$ , значит осуществляется рубящее лезвие.

Движение сырья в каналах ножевой решетки. Построение математической модели. Постановка задачи. Поток измельчаемого сырья формируется в предножевой зоне, из которой вытекает через отверстия ножевой решетки, при этом отверстия имеют длину  $b$  (она же толщина решетки) и диаметр. Принимаем, что поток сырья при подходе к ножевой решетке установился и его течение мож-

но считать стационарным. Для каждого отверстия (канала) можно записать систему дифференциальных уравнений неизотермического течения сплошной среды, которое моделируется двумерным течением [21].

В этом случае тангенциальная составляющая скорости равна нулю. Так как течение сырья является стационарным, а сплошная среда — аномально вязкой и несжимаемой, то, пренебрегая массовыми силами, которые малы вследствие довольно большой вязкости, дифференциальные уравнения можно представить в цилиндрической системе координат в виде:

- ♦ уравнения несжимаемости

$$(\partial v_z / \partial z) + (v_r / r) - (\partial v_r / \partial r) = 0, \quad (6)$$

- ♦ уравнения движения

$$\rho \left( v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + 2 \frac{\partial}{\partial r} \left( r \eta \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \eta \left( \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right] - 2 \eta \frac{v_r}{r^2}, \quad (7)$$

$$\rho \left( v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left( \eta \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \eta \left( \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right],$$

- ♦ уравнения энергии

$$\rho c \left( v_z \frac{\partial T}{\partial z} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \Phi, \quad (8)$$

где  $\Phi$  — функция диссипации, характеризующая интенсивность преобразования кинетической энергии в тепловую.

Предполагаем, что измельченное сырье представляет собой сплошную среду — суспензию. Гипотезу сплошности при изучении перемещения продуктов биохимического синтеза в каналах цилиндрической формы успешно применяли как зарубежные, так и отечественные авторы. [12, 18].

При изучении течения сплошной среды широко применяется реологическое уравнение в виде обобщенного степенного закона

$$\eta = \eta_0 e^{-\beta(T-T_0)} \left( \frac{I_2}{2} \right)^{m-1}, \quad (9)$$

где  $\eta_0$ ,  $m$  — константы материала;  $\beta$  — температурный коэффициент вязкости;  $I_2$  — квадратичный тензор скоростей деформаций, определяемый выражением

$$\frac{I_2}{2} = 2 \left[ \left( \frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{v_r}{r} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right)^2. \quad (10)$$

**Скорость процесса.** Скорость процесса резания пропорциональна движущей силе и обратно пропорциональна гидравлическому сопротивлению режущего механизма, состоящего из вращающегося ножа и перфорированной ножевой решетки.

В общем случае в процессе измельчения и движения сырья через ножевую решетку значения разности давлений и гидравлического сопротивления решетки с течением времени изменяются, поэтому переменную скорость движения сырья целесообразно выразить в дифференциальной форме:

$$V = \frac{dQ}{S \partial \tau}, \quad (11)$$

где  $Q$  — объем измельченного сырья,  $m^3$ ;  $S$  — площадь проходного (живого) сечения ножевой решетки,  $m^2$ ;  $\tau$  — продолжительность измельчения,  $s$ .

Тогда основное дифференциальное уравнение движения будет иметь вид

$$\frac{\partial Q}{S \partial \tau} = \frac{\Delta P}{\mu (R_1 + R_2 + R_3)}, \quad (12)$$

где  $\Delta P$  — разность давлений, Па;  $\mu$  — вязкость измельчаемого сырья, Па·с;  $R_1$  — сопротивление слоя сырья до ножевой решетки;  $R_2$  — сопротивление, создаваемое вращающимся ножом;  $R_3$  — гидравлическое сопротивление ножевой решетки.

Из уравнений (11) и (12) следует, что  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  выражаются в  $\text{м}^{-1}$ . Величины  $R_2$  и  $R_3$  в процессе измельчения можно считать приблизительно постоянными (пренебрегая возможным увеличением  $R_3$  вследствие проникновения в отверстие решетки измельченного сырья). Величина  $R_1$  с возрастанием слоя исходного сырья изменяется от нуля до максимального значения при полной загрузке. [21].

Для интегрирования уравнения (12) необходимо установить зависимость между сопротивлением слоя сырья перед ножевой решеткой  $R_1$  и объемом конечного продукта  $Q$ . Обозначим отношение объема слоя сырья к объему готового продукта через  $X_0$  (см. рис. 3).

Тогда объем слоя сырья перед ножевой решеткой будет равен  $X_0 Q$ . С другой стороны объем слоя исходного сырья можно выразить произведением  $h_0 \cdot F$ , где  $h_0$  — высота слоя сырья в м., равная высоте ножа (см. рис. 3), а  $F$  — общая площадь ножевой решетки,  $\text{м}^2$ .

Следовательно,

$$X_0 Q = h_0 \cdot F$$

$$\text{и } h_0 = X_0 \frac{Q}{F} \text{ или } R_1 = r_0 \cdot h_0 = r_0 X_0 \frac{Q}{F},$$

где  $r_0$  — удельное объемное сопротивление слоя исходного сырья,  $\text{м}^{-2}$ .

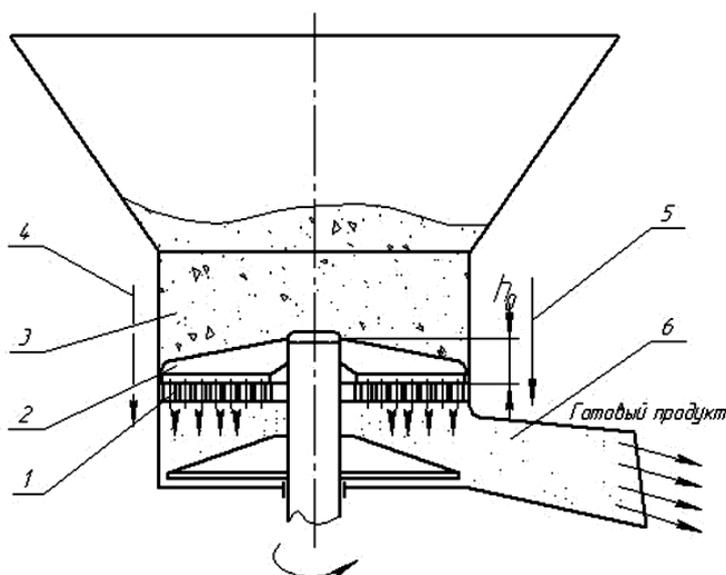


Рис. 3. Схема процесса тонкого измельчения мясного сырья:  
 1 — ножевая перфорированная решетка; 2 — многозубый вращающийся нож;  
 3 — мясная суспензия; 4 — направление движения измельчаемого сырья;  
 5 — направление действия силы тяжести; 6 — готовый тонко измельченный продукт

Fig. 3 Diagram of the process of fine grinding of meat raw materials:  
 1 — knife perforated grate; 2 — multi-pronged rotating knife; 3 — meat suspension; 4 — direction of movement of crushed raw materials; 5 — direction of gravity; 6 — finished finely ground product

Тогда

$$\frac{dQ}{Sd\tau} = V = \frac{\Delta P}{\mu \left( r_0 X_0 \frac{Q}{F} + R_2 + R_3 \right)}. \tag{13}$$

При  $\Delta P = \text{const}$  и неизменной температуре для данной конструкции эмульситатора все входящие в уравнение (13) величины, за исключением  $V$  и  $\tau$ , постоянны.

Проинтегрируем это уравнение в пределах от 0 до  $Q$  и от 0 до  $\tau$

$$\int_0^Q \mu (R_1 + R_2 + R_3) dQ = \int_0^\tau \Delta p S d\tau. \tag{14}$$

или

$$\mu(R_1 + R_2 + R_3)Q = \Delta p S \tau. \quad (15)$$

Откуда

$$Q = \frac{\Delta p S \tau}{\mu(R_1 + R_2 + R_3)}. \quad (16)$$

Уравнение (16) показывает непосредственную зависимость продолжительности измельчения от объема готового продукта  $Q$ .

Из уравнения (16) следует, что при  $\Delta p = \text{const}$  по мере увеличения объема готового продукта, а следовательно, и продолжительности процесса, скорость процесса измельчения уменьшается, а с увеличением проходного (живого) сечения  $S$  скорость процесса возрастает. Из уравнения (16) также видно, что с ростом гидравлического сопротивления ножевой решетки  $R_3$  скорость процесса измельчения уменьшается.

Таким образом, совершенствование процесса тонкого измельчения мясного сырья должно проходить по следующим направлениям:

увеличение проходного (живого) сечения ножевой решетки;

уменьшение гидравлического сопротивления ножевых решеток, входящих в комплект режущего механизма эмульсатора;

использование в конструкции режущей пары нож-решетка законов скользящего резания.

Ножевая решетка эмульсатора. Построение математической модели. Решетка эмульсатора (перфорированная пластина) должна иметь одинаковую пропускную способность по всей рабочей поверхности и создавать минимальное гидравлическое (аэродинамическое) сопротивление для мясного сырья.

Для решения этой задачи используем свойства чисел, известных в литературе под названием ряда Фибоначчи: 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21... . Как видно из этого ряда в нем каждое последующее число, начиная с третьего равно сумме двух предыдущих. [13, 16, 17].

В общем виде эта закономерность может быть представлена следующим образом

$$\alpha_{n+1} = \alpha_{n+2} + \alpha_n \text{ при } n \geq 1 \quad (\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 1). \quad (17)$$

Уравнение (17) представляет собой разностное уравнение второго порядка. Его общее решение имеет вид

$$\alpha_n = A_{q_1}^{n-1} + B_{q_2}^{n-1}, \quad (18)$$

где  $q_1 = \frac{1+\sqrt{5}}{2}$ ;  $q_2 = \frac{1-\sqrt{5}}{2}$ ;  $A$  и  $B$  — произвольные постоянные.

Так как

$$\alpha_1 = \alpha_2 = 1, \text{ то } A = \frac{1+\sqrt{5}}{2\sqrt{5}} \text{ и } B = \frac{\sqrt{5}-1}{2\sqrt{5}}.$$

Тогда

$$\alpha_n = \frac{1}{\sqrt{5}} \left[ \left( \frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^n - \left( \frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^n \right] \text{ при } n \geq 1. \quad (19)$$

По определению золотого сечения (золотой пропорции) имеем

$$a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\left( \frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^{n+1} - \left( \frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^{n+1}}{\left( \frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^n - \left( \frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^n} = \frac{1+\sqrt{5}}{2}. \quad (20)$$

Из (20) следует, что отношение двух соседних чисел ряда Фибоначчи в пределе составляет  $\alpha = \frac{1+\sqrt{5}}{2} = 1,6180$ . Легко проверить, что, начиная с пятого члена ряда Фибоначчи это отношение достаточно близко к золотому сечению:  $8/5=1,60000$ ;  $13/8=1,62500$ ;  $21/13=1,61528$ ;  $34/21=1,61904$ .

При этом оценка погрешности имеет вид

$$\frac{a_{n+1}}{a_n} - \alpha \leq \frac{1}{a^n a_n} \tag{21}$$

Из нее вытекает, что отношение  $a_{n+1} / a_n$  монотонно и достаточно быстро сходится к числу  $\alpha$  с ростом  $n$ , так как

$$\frac{1}{a^{n+1} a_{n+1}} < \frac{1}{a^n a_n} \tag{22}$$

Следовательно, с достаточной точностью можно считать, что

$$\alpha \approx \frac{a_{n+1}}{a_n}, \quad n \geq 5. \tag{23}$$

Разобьем рабочую поверхность ножевой решетки (рис. 4) на условные концентрические окружности, радиусы которых определяются по формуле:

$$R_n = (\sqrt{\alpha})^n R_0, \quad n = 1, 2, 3, 4, \dots, \tag{24}$$

где  $R_0$  — радиус центрального посадочного отверстия.

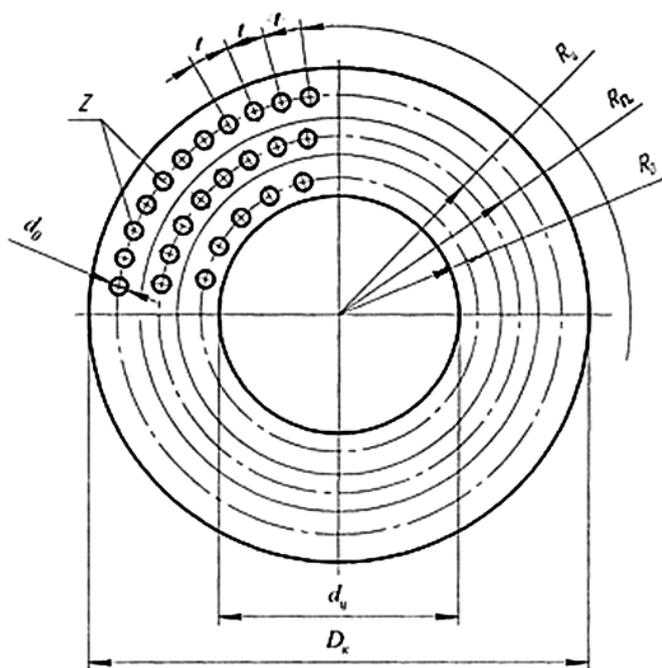


Рис. 4. Схема ножевой решетки эмульсификатора:

$D_k$  — наружный диаметр ножевой решетки;  $d_u$  — диаметр центрального посадочного отверстия;  $R_0$  — радиус центрального посадочного отверстия;  $R_n$  — радиус  $n$ -го условного кольца;  $R_u$  — центральный радиус  $n$ -го условного кольца;  $t$  — шаг между отверстиями;  $d_0$  — диаметр отверстий;  $Z$  — количество отверстий

Fig. 4. Diagram of the knife grid of the emulsifier:

$D_k$  — outer diameter of the knife grate;  $d_u$  — diameter of the central landing hole;  $R_0$  — radius of the central landing hole;  $R_n$  — radius of the  $n$ th conditional ring;  $R_u$  — central radius of the  $n$ th conditional ring;  $t$  — step between the holes;  $d_0$  — diameter of the holes;  $Z$  — number of holes

Отметим, что отверстия в кольцах располагаются на центральных радиусах каждого кольца. При этом предположении нетрудно показать, что пропускная способность любого кольца будет примерно одинаковой, если выбирать количество отверстий в каждом кольце равным соответствующим числу Фибоначчи. Действительно, пропускная способность  $n$ -го кольца с числом отверстий  $z$  равна

$$K_{i,n} = \frac{zf_0}{\pi(R_n^2 - R_{n-1}^2)}, \quad (25)$$

где  $f_0 = \pi r_0^2$  — площадь отверстия.

Соответственно для  $(n+1)$ -го кольца с числом отверстий ( $Z_{n+1}$ ) имеем

$$K_{i+1,n+1} = \frac{Z_{n+1}f_0}{\pi(R_{n+1}^2 - R_n^2)}, \quad (26)$$

По условию  $K_n \approx K_{n+1}$ , следовательно

$$\frac{Z_n f_0}{\pi(R_n^2 - R_{n-1}^2)} : \frac{Z_{n+1} f_0}{\pi(R_{n+1}^2 - R_n^2)} = 1. \quad (27)$$

Отсюда получаем:

$$\frac{a_{n+1}}{a_n} \approx \frac{R_{i+1}^2 - R_i^2}{R_i^2 - R_{i-1}^2} = \frac{Z^{n+1} R_0^2 - Z^n R_0^2}{Z^n R_0^2 - Z^{n-1} R_0^2} = \alpha. \quad (28)$$

Таким образом, чем больше количество отверстий  $Z_n$  в кольцах, тем точнее будет соблюдаться условие  $K_n \approx K_{n+1}$  и, тем самым, будет меньше аэродинамическое (гидравлическое) сопротивление ножевой решетки.

Данная модель справедлива при любом диаметре отверстий и различных их количествах, но значения диаметров отверстий и их число должно быть принято из ряда предпочтительных чисел, т.е. ряда чисел Фибоначчи.

**Заключение.** Изучены основные способы измельчения различных материалов, к которым относятся резание, раздавливание, распиливание, разламывание, истирание, ударом, при этом в технологическом оборудовании мясокомбинатов измельчение достигается сочетанием нескольких видов механического воздействия. Его выбор определяется физико-механическими свойствами измельчаемого материала (прочность, упругость, пластичность, вязкость, мягкость и т.п.).

Показаны преимущества скользящего резания перед рубящим. При скользящем резании продукт значительно меньше деформируется, твердые продукты не крошатся и не утрачивают своей ценности, сочные продукты не теряют сока, а их ломтики не разваливаются и не деформируются.

Построена математическая модель движения сырья в каналах ножевой решетки. С учетом ряда допущений дифференциальные уравнения модели представлены в цилиндрической системе координат в виде:

- ♦ уравнения несжимаемости;
- ♦ уравнения движения;
- ♦ уравнения энергии.

Применительно к потоку (течению) сплошной среды записано реологическое уравнение в виде обобщенного степенного закона.

В результате получено уравнение, показывающее непосредственную зависимость продолжительности измельчения от объема готового продукта.

Таким образом установлено, что совершенствование процесса тонкого измельчения мясного сырья должно осуществляться по следующим направлениям:

- ♦ увеличение проходного (живого) сечения ножевой решетки;
- ♦ уменьшение гидравлического сопротивления ножевых решетках, входящих в комплект режущего механизма эмульсатора;
- ♦ использование в конструкции режущей пары нож-решетка законов скользящего резания.

Разработана математическая модель ножевой решетки эмульсатора. При концентрическом расположении отверстий модель позволяет получить одинаковую пропускную способность по всей

рабочей поверхности ножевой решетки в горизонтальной плоскости при минимальном гидравлическом сопротивлении мясного сырья.

Данная модель справедлива при любом диаметре отверстий и различных их количествах, но значение диаметров и их число должно быть принято из ряда предпочтительных чисел.

#### Список использованных источников

1. *Адрианов, А. С.* Литые решетки к волчкам с отверстиями малого диаметра / А.С. Адрианов, Г.А. Мартынов. — М.: ЦНИИТЭИмясомолпром, 1980. — С.19–22.
2. *Машины и аппараты пищевых производств: учебник для ВУЗов. Книга 2. Том 2 / С.Т. Антипов, В.Я. Груданов, И.Т. Кретов, А.Н. Остриков, В.А. Панфилов, О.А. Ураков, В.А. Шаршунов; под ред. В.А. Панфилова и В.Я. Груданова* — Минск: БГАТУ, 2008. — 591 с.
3. *Машины и аппараты пищевых производств: учебник для ВУЗов. Книга 3 / С.Т. Антипов, В.Я. Груданов, И.Т. Кретов, А.Н. Остриков, В.А. Панфилов, О.А. Ураков, В.А. Шаршунов; под ред. В.А. Панфилова и В.Я. Груданова* — Минск: БГАТУ, 2008. — 620 с.
4. *Бабиченко, Л. В.* Основы технологии пищевых производств: учебник для мех. фак. торг. вузов / Л.В. Бабиченко. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Экономика, 1983. — 216 с.
5. *Машины и аппараты пищевых производств: учебник для ВУЗов. Книга 1/ С.Т. Антипов, В.Я. Груданов, И.Т. Кретов, А.Н. Остриков, В.А. Панфилов, О.А. Ураков, В.А. Шаршунов; под ред. В.А. Панфилова и В.Я. Груданова*. — Минск: БГАТУ, 2007. — 420 с.
6. *Антипов, С. Т.* Машины и аппараты пищевых производств: учебник для ВУЗов. Книга 2. Том 1 / С.Т. Антипов, В.Я. Груданов, И.Т. Кретов, А.Н. Остриков, В.А. Панфилов, О.А. Ураков, В.А. Шаршунов; под ред. В.А. Панфилова и В.Я. Груданова — Минск: БГАТУ, 2008. — 580 с.
7. *Технологическое оборудование мясокомбинатов / С. А. Бредихин [и др.]*. — М.: Колосс, 1997. — 392 с.
8. *Бренч, А. А.* Разработка новых конструкций ножей для тонкого измельчения мясного сырья / А.А. Бренч, Л.Т. Ткачева, В.И. Никулин // Оборудование и технологии пищевых производств: тем. сб. науч. тр. / Донецк: ДонГУЭТ, 1999. — С. 108–112.
9. *Быстров, С. А.* Новая конструкция ножей для измельчения мяса на волчках / С.А. Быстров, В.А. Степанова // Мясная индустрия СССР. — 1976. — №6. — С. 18–19.
10. *Генин, Э. С.* Основные направления создания оборудования для мясной промышленности / Э.С. Генин // Мясная индустрия СССР. — 1987. — №6. — С. 1–4.
11. *Горбатов, А. В.* Влияние некоторых технологических факторов на реологические свойства колбасного фарша и готовых изделий // А.В. Горбатов, В.Д. Косой, В.В. Елкин // Мясная индустрия СССР. — 1976. — №1. — С. 23–26.
12. *Горбатов, А. В.* Реология мясных и молочных продуктов / А.В. Горбатов. — М.: Пищевая промышленность, 1979. — 384 с.
13. *Груданов, В. Я.* Применение чисел Фибоначчи и Золотой пропорции в конструировании рабочих органов технологического оборудования / В.Я. Груданов, В.И. Иванцов // Тез. докл. 13-ой научно-техн. конференции «Научно-технический прогресс в пищевой промышленности». — Могилев: МТИ, 1993. — С 130.
14. *Груданов, В. Я.* Технологическое оборудование пищевых производств (лабораторный практикум): учебн. пособие / В.Я. Груданов, И.М. Кирик; под. ред. В.Я. Груданова. — Мн.: Изд. Центр БГУ, 2005. — 205 с.
15. *Даурский, А. Н.* Резание пищевых материалов. Теория процесса, машины, интенсификация / А.Н. Даурский, Ю.А. Мачихин. — М.: Пищевая промышленность, 1980. — 240 с.
16. *Иванцов, В. И.* Совершенствование конструкций вращающихся ножей для измельчения продуктов / В.И. Иванцов // Тез. докл. международной научно-техн. конференции «Научно-технический прогресс в пищевой промышленности». — Могилев: МТИ, 1995. — С 64.
17. *Ивашов, В. И.* Технологическое оборудование предприятий мясной промышленности: учебное пособие: в 2 ч. / В.И. Ивашов. — СПб.: Гиорд, 2007. — Ч. 2: Оборудование для переработки мяса. — 464 с.
18. *Изменение структурно-механических свойств фарша при механической обработке / В.М. Зацерковный [и др.] // Мясная индустрия СССР. — 1982. — №2. — С. 27 — 29.*
19. *Клименко, М. Н.* Оценка качества среза пищевых продуктов / М.Н. Клименко, И.Н. Лебедев // Респ. межвед. науч.-техн. сб., 1983. — Вып. 29: Пищевая промышленность. — С. 25–27.
20. *Кармас, Э.* Технология колбасных изделий / Э. Кармас. — М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. — 215 с.
21. *Касаткин, А. Г.* Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. — М.: Химия, 1973. — 762 с.

22. *Косой, В. Д.* Совершенствование производства колбас (теоретические основы, процессы, оборудование, технология, рецептура и контроль качества) / В.Д. Косой, В.П. Дорохов. — М.: ДеЛи принт, 2006. — 766 с.

#### **Информация об авторах**

*Груданов Владимир Яковлевич* — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологий и технического обеспечения процессов переработки сельскохозяйственной продукции учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (220124, г. Минск, пр-т Независимости, 99, Республика Беларусь).

*Бренч Андрей Александрович* — кандидат технических наук, доцент кафедры технологий и технического обеспечения процессов переработки сельскохозяйственной продукции учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (220124, г. Минск, пр-т Независимости, 99, Республика Беларусь). E-mail: abrench@mail.ru

*Торган Анна Борисовна* — кандидат технических наук, доцент кафедры технологий и технического обеспечения процессов переработки сельскохозяйственной продукции учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (220124, г. Минск, пр-т Независимости, 99, Республика Беларусь). E-mail: anechkatorgan@mail.ru

*Дацук Игорь Евгеньевич* — старший преподаватель кафедры технологий и технического обеспечения процессов переработки сельскохозяйственной продукции учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (220124, г. Минск, пр-т Независимости, 99, Республика Беларусь). E-mail: Datsukigor@gmail.com

*Зеленко Сергей Анатольевич* — магистр технических наук, старший преподаватель кафедры технологий и технического обеспечения процессов переработки сельскохозяйственной продукции учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (220124, г. Минск, пр-т Независимости, 99, Республика Беларусь). E-mail: Sergey-zelenko@mail.ru

*Василевская Валентина Владимировна* — старший преподаватель кафедры технологий и технического обеспечения процессов переработки сельскохозяйственной продукции учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (220124, г. Минск, пр-т Независимости, 99, Республика Беларусь). E-mail: vasilinka-w@mail.ru

#### **Information about the authors**

*Grudanov Vladimir Yakovlevich* — D.Sc. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Technology and technical support of the processing of agricultural products, Belarusian State Agrarian Technical University (Nezavisimosti ave. 99, 220124, Minsk, Republic of Belarus).

*Brench Andrey Alexandrovich* — PhD (Engineering), Assistant Professor of the Department of Technology and technical support of the processing of agricultural products, Belarusian State Agrarian Technical University (Nezavisimosti ave. 99, 220124, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: abrench@mail.ru

*Torgan Anna Borisovna* — PhD (Engineering), Assistant Professor of the Department of Technology and technical support of the processing of agricultural products, Belarusian State Agrarian Technical University (Nezavisimosti ave. 99, 220124, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: anechkatorgan@mail.ru

*Datsuk Igor Evgenyevich* — Senior Lecturer of the Department of Technology and technical support of the processing of agricultural products, Belarusian State Agrarian Technical University (Nezavisimosti ave. 99, 220124, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Datsukigor@gmail.com

*Zelenko Sergey Anatolyevich* — Senior Lecturer of the Department of Technology and technical support of the processing of agricultural products, Belarusian State Agrarian Technical University (Nezavisimosti ave. 99, 220124, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Sergey-zelenko@mail.ru

*Vasilevskaya Valentina Vladimirovna* — Senior Lecturer of the Department of Technology and technical support of the processing of agricultural products, Belarusian State Agrarian Technical University (Nezavisimosti ave. 99, 220124, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vasilinka-w@mail.ru