

МЕХАΝІЗАЦЫЯ І ЭНЕРГЕТЫКА

УДК 637.53

В. Я. ГРУДАНОВ, А. А. БРЕНЧ, И. Е. ДАЦУК

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ МЯСОКОСТНОГО СЫРЬЯ В ОБВАЛОЧНЫХ ПРЕССАХ С УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫМИ РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ

Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск,
Республика Беларусь, e-mail: bsatu-itf@tut.by

(Поступила в редакцию 18.10.2012)

Введение. В настоящее время в птицеперерабатывающей промышленности разных стран, в том числе и в Республике Беларусь, для разделения мясокостного сырья птицы широко используется процесс механической сепарации, который заключается в размельчении исходного сырья и последующем отделении кости, соединительной ткани и сухожилий путем пропускания размельченного сырья через «сито» под высоким давлением. Несмотря на существование устройств различных типов, процесс отделения мяса от кости не является совершенным, кроме того, имеют место высокие энергозатраты на выработку продукции при завышенной металлоемкости оборудования.

Сепарирующая перфорированная втулка является основным элементом пресса, обеспечивающим отделение мяса от кости. По своей конструкции различают перфорированные втулки цилиндрические и конические с количеством отверстий от 3600 до 32000. Для разного вида сырья используются перфорированные втулки с разным диаметром отверстий – от 0,4 мм (для обвалки рыбы и частей тушки птицы с содержанием мяса не менее 80%) до 1,9 мм (для дообвалки мяса всех видов домашней птицы с содержанием мяса на кости не менее 25%) [1].

Цель исследований – разработка математической модели процесса разделения мясокостного сырья в обвалочных прессах с усовершенствованными рабочими органами шнекового узла отжатия.

Предварительные сведения. В рабочей камере обвалочных прессов мясокостное сырье заключено между валом шнека и цилиндрической стенкой перфорированной втулки с общей осью, радиусами R_b и R_c и поверхностями S_b и S_c (рис. 1).

Принимаем следующие условия.

Условие 1 – мясокостное сырье, расположенное внутри перфорированной втулки (цилиндра), находится в состоянии установившегося процесса, т. е.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = 0,$$

где c – концентрация мышечной ткани в мясокостном сырье; t – некоторый момент времени.

Условие 2 – процесс протекает только в плоскости, перпендикулярной оси перфорированной втулки (цилиндра).

Условие 3 – концентрация мышечной ткани в каждой точке окружности с центром на оси цилиндра одна и та же.

Условие 4 – известна концентрация у поверхности вала шнека и внутренней поверхности перфорированной втулки (цилиндра), т. е.

$$c|_{S_b} = c_b \text{ и } c|_{S_c} = c_c.$$

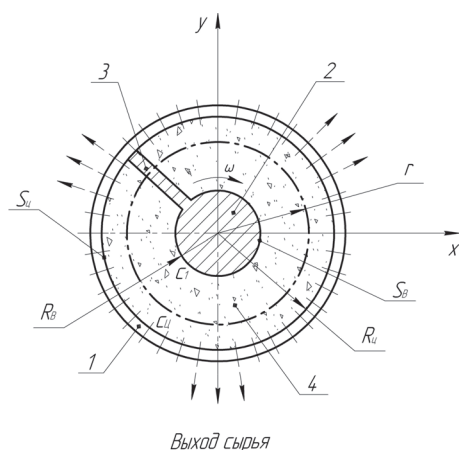


Рис. 1. Схема поперечного сечения рабочей камеры обвалочного пресса: 1 – перфорированная втулка (цилиндр); 2 – вал шнека; 3 – ребро шнека; 4 – мясокостное сырье; ω – вращение шнека; R_b – радиус вала шнека; R_u – радиус перфорированной втулки (цилиндра); r – расстояние от оси перфорированной втулки (цилиндра) до рассматриваемой точки; S_b – поверхность вала шнека; S_u – внутренняя поверхность перфорированной втулки (цилиндра); c_b – концентрация мышечной ткани у поверхности вала шнека; c_u – концентрация мышечной ткани у внутренней поверхности перфорированной втулки (цилиндра)

откуда

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}; \quad (4)$$

$$\varphi = \arctg \frac{y}{x}. \quad (5)$$

В силу условия 3 $c = c(r)$, т. е. концентрация от φ не зависит (см. рис. 1).

Выразим теперь $\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$ и $\frac{\partial^2 c}{\partial y^2}$ через r и φ . Для этого с учетом формул (3)–(5) найдем

$$\frac{\partial c}{\partial x} = \frac{dc}{dr} \frac{\partial r}{\partial x} = \frac{dc}{dr} \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \frac{dc}{dr} \cos \varphi; \quad (6)$$

$$\frac{\partial c}{\partial y} = \frac{dc}{dr} \frac{\partial r}{\partial y} = \frac{dc}{dr} \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \frac{dc}{dr} \sin \varphi \quad (7)$$

и

$$\left(\frac{dc}{dr} \cos \varphi \right) = \frac{d^2 c}{dr^2} \frac{\partial r}{\partial x} \cos \varphi + \frac{dc}{dr} (-\sin \varphi) \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{d^2 c}{dr^2} \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \cos \varphi - \frac{dc}{dr} \sin \varphi \frac{-\frac{y}{x^2}}{1 + \left(\frac{y}{x}\right)^2} = \frac{d^2 c}{dr^2} \cos^2 \varphi + \frac{dc}{dr} \frac{\sin^2 \varphi}{r}; \quad (8)$$

Требуется определить зависимость концентрации мышечной ткани на расстояния r от оси перфорированной втулки цилиндра (см. рис. 1, где показано сечение сепаратора плоскостью, перпендикулярной оси перфорированной втулки).

Для построения математической модели воспользуемся материалами, изложенными в работе В. Г. Скатецкого [2].

Построение математической модели. Принимаем, что ось Oz направлена по оси перфорированной втулки (цилиндра). Тогда, с учетом условия 2

$$\frac{\partial c}{\partial t} = 0. \quad (1)$$

Так как процесс установившийся, то его дифференциальное уравнение будет уравнением Лапласа

$$\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} = 0 \quad (2)$$

с краевыми условиями

$$c|_{S_1} = c_1 \quad \text{и} \quad c|_{S_2} = c_2.$$

Следовательно, имеет место задача Дирихле.

Чтобы найти решение уравнения, осуществим переход к полярным координатам

$$\left. \begin{aligned} x &= r \cos \varphi; \\ y &= r \sin \varphi; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 c}{\partial y^2} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{dc}{dr} \sin \varphi \right) = \frac{d^2 c}{dr^2} \frac{\partial r}{\partial y} \sin \varphi + \frac{dc}{dr} \cos \varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x} =$$

$$\frac{d^2 c}{dr^2} \sin^2 \varphi + \frac{dc}{dr} \cos \varphi \frac{1}{1 + \left(\frac{y}{x} \right)^2} = \frac{d^2 c}{dr^2} \sin^2 \varphi + \frac{dc}{dr} \frac{\cos^2 \varphi}{r}. \quad (9)$$

Полученные значения $\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$ и $\frac{\partial^2 c}{\partial y^2}$ подставим в уравнение (2). В результате получим обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка:

$$\frac{d^2 c}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dc}{dr} = 0 \quad (10)$$

с краевыми условиями

$$c(R_b) = c_b, \quad c(R_n) = c_n.$$

Чтобы решить его, применим метод понижения порядка дифференциального уравнения, т. е. положим

$$\frac{dc}{dr} = u. \quad (11)$$

Тогда

$$\frac{d^2 c}{dr^2} = \frac{du}{dr}. \quad (12)$$

С учетом выражений (11) и (12) исходное уравнение (10) примет следующий вид:

$$\frac{du}{dr} + \frac{1}{r} u = 0, \quad (13)$$

откуда

$$\ln |u| = -\ln |r| + \ln P_1 \quad (14)$$

(P_1 – произвольная постоянная).

После потенцирования имеем

$$u = \frac{P_1}{r} = \frac{dc}{dr}. \quad (15)$$

Решая это уравнение, находим

$$c = P_1 \ln |r| + P_2. \quad (16)$$

(P_2 – произвольная постоянная).

Так как по смыслу задачи $r > 0$, то общее решение исходного уравнения можно записать так:

$$c = P_1 \ln r + P_2. \quad (17)$$

Для определения P_1 и P_2 воспользуемся краевыми условиями:

$$c_b = P_1 \ln R_b + P_2; \quad (18)$$

$$c_n = P_1 \ln R_n + P_2. \quad (19)$$

Решая эту систему уравнений, находим

$$P_1 = \frac{c_u - c_b}{\ln R_u - \ln R_b}; \quad (20)$$

$$P_2 = \frac{c_b \ln R_u - c_u \ln R_b}{\ln R_u - \ln R_b}. \quad (21)$$

Подставив эти значения в общее решение, получим формулу для определения концентрации мышечной ткани в винтовых канавках шнека:

$$c = \frac{c_u \ln \frac{r}{R_b} - c_b \ln \frac{r}{R_u}}{\ln \frac{R_u}{R_b}}. \quad (22)$$

Новые технические решения. На рис. 2 представлена схема продольного разреза рабочей камеры обвалочного пресса по патенту Республики Беларусь на изобретение № 15325 [3].

В данном устройстве шнек выполнен в виде конусного вала 1 с ребрами 2, образующими винтовые канавки 3 одинаковой ширины, при этом оси отверстий перфорированной втулки (цилиндра) 4 расположены наклонно к ее цилиндрической рабочей поверхности под углом α и перпендикулярно к поверхности конусного вала 1 шнека. Выполнение отверстий упомянутым выше образом позволяет увязать силу нормального давления N , создаваемую конусным валом шнека и определяющую направление движения мясной фракции, с углом наклона осей отверстий перфорированной втулки (цилиндра). Это позволяет избежать дополнительного нежелательного сопротивления и сдавливания продукта и, как следствие, повысить эффективность работы устройства для механической обвалки мяса.

Если оси отверстий перфорированной втулки 2 расположены наклонно к ее цилиндрической рабочей поверхности, но не перпендикулярно к поверхности конусного вала 1 шнека, то будет иметь место дополнительное сопротивление, создаваемое силами трения, что отрицательно скажется на работе устройства.

Количество винтовых канавок может быть 3, 4, 5 и т. д., при этом конструкция шнека нагнетающего типа прежде всего характеризуется коэффициентом уплотнения (сжатия), который должен иметь одинаковое значение во всех канавках.

С целью получения постоянного значения коэффициентов уплотнения во всех винтовых канавках нами разработано новое техническое решение, на которое получен патент на изобретение Республики Беларусь № 15328 [4].

В устройстве, представленном на рис. 3, шнек 1 имеет винтовые канавки 2 одинаковой ширины (длины), однако наличие конусного вала наделяет шнек нагнетающей функцией.

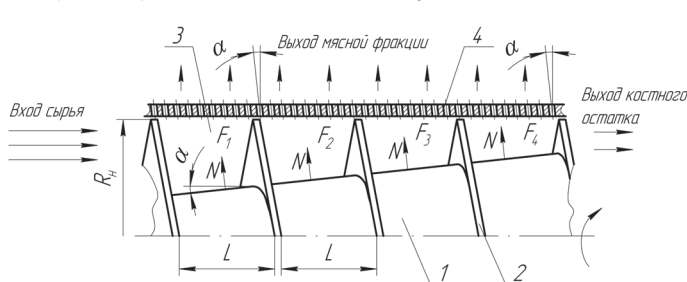


Рис. 2. Схема продольного разреза рабочей камеры обвалочного пресса по патенту РБ на изобретение №15325: 1 – конусный вал шнека; 2 – ребро шнека; 3 – винтовая канавка; 4 – перфорированная втулка; N – сила нормального давления; α – угол наклона осей отверстий перфорированной втулки (цилиндра); F_1 , F_2 , F_3 и F_4 – площади 1-й, 2-й, 3-й и 4-й винтовых канавок соответственно; L – ширина (длина) винтовой канавки

Угол наклона конусного вала α_{n+1} в каждой последующей винтовой канавке 2 шнека 1 уменьшается по ходу движения сырья ($\alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3 > \alpha_4$) и определяется по формуле

$$\alpha_{n+1} = \alpha_n \frac{R_{n+1}}{R_n}, \quad (23)$$

где α_n – угол наклона вала n -го витка шнека, град; α_{n+1} – угол наклона вала $(n+1)$ -го витка шнека, град; R_n – начальный радиус n -й винтовой канавки шнека, м; R_{n+1} – начальный радиус $(n+1)$ -й винтовой канавки шнека, м.

Выполнение конусного вала с переменным углом наклона, уменьшающегося по ходу движения сырья и определяемого в каждой винтовой канавке по формуле (23), позволяет постепенно и равномерно уплотнять исходное сырье, что приводит к выравниванию коэффициента уплотнения (сжатия) по всем винтовым канавкам, т. е. коэффициент уплотнения в первой канавке равен коэффициенту уплотнения во второй, а коэффициент уплотнения во второй канавке равен коэффициенту уплотнения в третьей и т. д.

В результате имеет место постоянное и равномерное уплотнение мясного сырья по всей длине шнека (по всем винтовым канавкам), как следствие, эффективность работы устройства повышается: происходит более качественное разделение мясокостного сырья на отдельные фракции.

Если конусный вал I будет иметь постоянный угол наклона по всей длине шнека, то коэффициент уплотнения будет иметь разные значения в каждой винтовой канавке, что отрицательно скажется на работе устройства.

Покажем это на конкретных примерах, но предварительно отметим следующее. Как известно, под коэффициентом уплотнения (сжатия) K понимается отношение объемов двух соседних винтовых канавок шнека. Для упрощения расчетов в примерах заменим объемы винтовых канавок их площадями нормального поперечного сечения, т. е. принимаем, что

$$K = \frac{V_2}{V_1} = \frac{F_2}{F_1},$$

где V_1, V_2, F_1, F_2 – объем и площадь нормального поперечного сечения первой и второй по ходу движения сырья винтовых канавок соответственно.

При этом площадь каждой винтовой канавки считаем по формуле площади неравнобокой трапеции. Однако следует отметить, что принятые допущения не нарушают принцип работы устройства.

Пример. Для расчета принимаем начальный радиус первой винтовой канавки шнека $R_1 = 0,020$ м; угол наклона конусного вала первой винтовой канавки шнека $\alpha_1 = 10^\circ$; ширина каждой винтовой канавки шнека $L = 0,070$ м; наружный радиус шнека $R_n = 0,080$ м; угол наклона конусного вала α_{n+1} в каждой последующей винтовой канавке шнека уменьшается по ходу движения сырья и определяется по формуле (23). Число канавок – 4 (см. рис. 3).

1. Определяем начальный радиус в канавках шнека:

$$R_2 = L \operatorname{tg} \alpha_1 + R_1 = 0,070 \cdot \operatorname{tg} 10^\circ + 0,020 = 0,032 \text{ м};$$

$$\alpha_2 = \alpha_1 \frac{R_1}{R_2} = 10 \cdot \frac{0,020}{0,032} = 6,25^\circ;$$

$$R_3 = L \operatorname{tg} \alpha_2 + R_2 = 0,070 \cdot \operatorname{tg} 6,25^\circ + 0,032 = 0,040 \text{ м};$$

$$\alpha_3 = \alpha_2 \frac{R_2}{R_3} = 6,25 \cdot \frac{0,032}{0,040} = 5,0^\circ;$$

$$R_4 = L \operatorname{tg} \alpha_3 + R_3 = 0,070 \cdot \operatorname{tg} 5,0^\circ + 0,040 = 0,046 \text{ м};$$

$$\alpha_4 = \alpha_3 \frac{R_3}{R_4} = 5,0 \cdot \frac{0,040}{0,046} = 4,35^\circ;$$

$$R_5 = L \operatorname{tg} \alpha_4 + R_4 = 0,070 \cdot \operatorname{tg} 4,35^\circ + 0,046 = 0,051 \text{ м}.$$

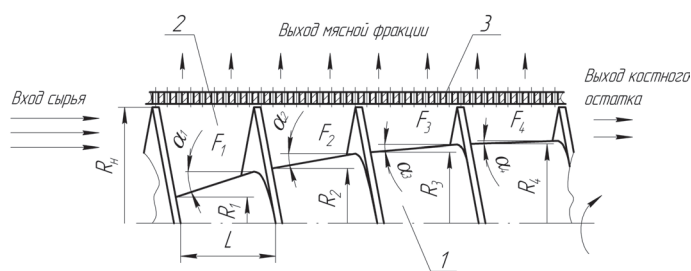


Рис. 3. Схема продольного разреза рабочей камеры обвалочно-го пресса по патенту РБ на изобретение №15328: 1 – конусный вал шнека; 2 – винтовая канавка; 3 – перфорированная втулка; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ – угол наклона образующей конусного вала шнека на 1-й, 2-й, 3-й и 4-й винтовой канавке соответственно; F_1, F_2, F_3 и F_4 – площади 1-й, 2-й, 3-й и 4-й винтовых канавок шнека соответственно; R_1, R_2, R_3, R_4 – начальные радиусы конусного вала шнека на 1-й, 2-й, 3-й и 4-й винтовой канавке соответственно; L – ширина (длина) винтовой канавки

2. Находим площадь каждой винтовой канавки (по формуле площади неравнобокой трапеции)

$$F_1 = L \left(R_{\text{н}} - \frac{R_1 + R_2}{2} \right) = 0,070 \cdot \left(0,080 - \frac{0,020 + 0,032}{2} \right) = 3,78 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2;$$

$$F_2 = L \left(R_{\text{н}} - \frac{R_2 + R_3}{2} \right) = 0,070 \cdot \left(0,080 - \frac{0,032 + 0,040}{2} \right) = 3,08 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2;$$

$$F_3 = L \left(R_{\text{н}} - \frac{R_3 + R_4}{2} \right) = 0,070 \cdot \left(0,080 - \frac{0,040 + 0,046}{2} \right) = 2,59 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2;$$

$$F_4 = L \left(R_{\text{н}} - \frac{R_4 + R_5}{2} \right) = 0,070 \cdot \left(0,080 - \frac{0,046 + 0,051}{2} \right) = 2,21 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

3. Определяем частные значения коэффициента уплотнения K (по площадям):

$$K_1 = \frac{F_1}{F_2} = \frac{3,78 \cdot 10^{-3}}{3,08 \cdot 10^{-3}} = 1,23 \approx 1,2;$$

$$K_2 = \frac{F_2}{F_3} = \frac{3,08 \cdot 10^{-3}}{2,59 \cdot 10^{-3}} = 1,19 \approx 1,2;$$

$$K_3 = \frac{F_3}{F_4} = \frac{2,59 \cdot 10^{-3}}{2,21 \cdot 10^{-3}} = 1,17 \approx 1,2.$$

4. Из расчетов следует, что $K_1 \approx K_2 \approx K_3$, следовательно, предложенное техническое решение обеспечивает постепенное и равномерное уплотнение сырья в винтовых канавках шнека, что повышает эффективность работы устройства.

На рис. 2 и 3 видно, что по ходу движения сырья площадь винтовых канавок шнека уменьшается, так как увеличивается радиус вала шнека ($R_4 > R_3 > R_2 > R_1$), при этом концентрация мышечной ткани будет разная.

Для определения концентрации мышечной ткани в каждой винтовой канавке шнека воспользуемся формулой (22):

в 1-й канавке

$$c^I = \frac{c_{\text{ц}}^I \ln \frac{r^I}{R_{\text{б}}^I} - c_{\text{б}}^I \ln \frac{r^I}{R_{\text{ц}}^I}}{\ln \frac{R_{\text{ц}}^I}{R_{\text{б}}^I}},$$

во 2-й канавке

$$c^{II} = \frac{c_{\text{ц}}^{II} \ln \frac{r^{II}}{R_{\text{б}}^{II}} - c_{\text{б}}^{II} \ln \frac{r^{II}}{R_{\text{ц}}^{II}}}{\ln \frac{R_{\text{ц}}^{II}}{R_{\text{б}}^{II}}},$$

в 3-й канавке

$$c^{III} = \frac{c_{\text{ц}}^{III} \ln \frac{r^{III}}{R_{\text{б}}^{III}} - c_{\text{б}}^{III} \ln \frac{r^{III}}{R_{\text{ц}}^{III}}}{\ln \frac{R_{\text{ц}}^{III}}{R_{\text{б}}^{III}}}.$$

в 4-й канавке

$$c^{IV} = \frac{c_{ц}^{IV} \ln \frac{r^{IV}}{R_b^{IV}} - c_b^{IV} \ln \frac{r^{IV}}{R_{ц}^{IV}}}{\ln \frac{R_{ц}^{IV}}{R_b^{IV}}}$$

Таким образом, полученная математическая модель позволяет определить концентрацию мышечной ткани применительно к конкретному техническому решению и дает возможность установить изменение концентрации вещества как по высоте винтовой канавки, так и по длине рабочей части шнека конусного типа и, следовательно, определить эффективность разделения мясокостного сырья в данном прессе.

Заключение. Установлена и математически определена зависимость изменения концентрации мышечной ткани от конструктивных и геометрических характеристик рабочих органов обвалочных прессов в процессе разделения мясокостного сырья.

Разработано новое техническое решение, позволяющее связать расположение отверстий перфорации сепарирующей втулки с силой нормального давления, создаваемой конусным валом шнека и обуславливающая характер направления движения мясной фракции с минимально возможным гидравлическим сопротивлением при улучшении качества процесса разделения сырья.

Предложено новое техническое решение, позволяющее получить одинаковое значение коэффициентов уплотнения сырья по всей длине рабочей части конусного шнека, что существенно повышает качество процесса разделения мясокостного сырья за счет его постепенного и равномерного сжатия при минимальных потерях мясного сока.

Показано практическое применение полученной математической модели для определения концентрации мышечной ткани в зависимости от конструктивных особенностей рабочего шнека обвалочного пресса.

Полученные данные могут быть положены в основу разработки методики для определения конструктивных, геометрических и технологических параметров рабочих органов обвалочных прессов, в которых процесс разделения мясокостного сырья происходит при минимальных энергозатратах, увеличенной производительности и повышенном качестве готовых продуктов.

Литература

1. Мясо птицы механической обвалки / В. А. Гоноцкий [и др.]. – М.: Изд-во ООО «Фирма «Альфа-Дизайн», 2004. – 200 с.
2. *Скатецкий, В. Г.* Математическое моделирование физико-химических процессов / В. Г. Скатецкий. – Минск: Выш. школа, 1981. – 144 с.
3. Устройство для разделения мясокостного сырья: пат. № 15328 Респ. Беларусь, МПК7 А22 С17/04 / В. Я. Груданов, А. А. Бренч, И. Е. Дацук; заявитель Бел. гос. аграр. техн. ун-т. – №а 20091314; заявл. 11.09.09; опубл. 30.04.11 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 84. – С. 53.
4. Устройство для разделения мясокостного сырья: пат. № 15325 Респ. Беларусь, МПК А 22 С 17/04 / В. Я. Груданов, А. А. Бренч, И. Е. Дацук; заявитель Бел. гос. аграр. техн. ун-т. – № а20091143; заявл. 28.07.2009.; опубл. 28.02.2011 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 84. – С. 52.

V. YA. GRUDANOV, A. A. BRENCH, I. E. DATSUK

MODELLING OF THE PROCESS OF SEPARATION OF MEAT-AND-BONE RAW MATERIALS IN BONING PRESSES WITH IMPROVED TOOLS

Summary

Developed is the mathematical model of separation of meat raw materials in screw presses, enabling to identify the change of concentration of a muscular tissue both on height of a spiral flute and on length of a working part of the screw. Proposed are new technical solutions increasing the performance of boning presses due to the interrelation of perforation holes of a separating plug with the direction of normal pressure force to be created by tapered shaft of a screw, and the equality of compression ratio of raw materials along the working part of a screw.