

УДК 664.7:631.363.28:621.979.2

Экспериментальные исследования напряженного состояния слоя комбикорма в клиновидном рабочем пространстве пресс-гранулятора

И.Т. Ковриков, А.С. Кириленко

ФГБОУ ВПО «Оренбургский государственный университет», ОГУ, 460018, Оренбург, Российская Федерация, пр-т Победы, д. 13

Experimental research of stress state of feed in wedge-shaped workspace of pellet mill

I.T. Kovrikov, A.S. Kirilenko

Orenburg State University, OSU, 460018, Orenburg, Russian Federation, Pobedy ave., 13



e-mail: kovrikovit@mail.ru, as@askirilenko.ru, integral138@mail.ru



Задача экспериментального определения контактных напряжений во всех зонах клиновидного рабочего пространства пресс-гранулятора является актуальной при совершенствовании процесса гранулирования комбикормов, который сопровождается интенсивным непроизводительным боковым выдавливанием прессуемой массы за пределы рабочих поверхностей кольцевой матрицы и прессующего ролика. С целью осуществления структурно-параметрического синтеза прессующего механизма гранулятора по комплексной математической модели процесса требуется многоуровневая проверка ее адекватности. Характер изменения параметров напряженного состояния комбикорма в клиновидном пространстве недостаточно изучен, поэтому важно корректное описание этих параметров, непосредственно от которых зависят показатели, характеризующие эффективность процесса. Предложен метод исследования напряженного состояния в условиях незамкнутого и замкнутого клиновидного пространства, позволяющий получить распределение контактных напряжений в тангенциальном направлении и по ширине цилиндрических рабочих органов, определить осевые напряжения в слое комбикорма. Для реализации метода создана лабораторная установка и разработаны конструкции силоизмерительных рабочих органов — прессующего ролика и сменного ограничительного кольца. По измеренным напряжениям, нормальным к поверхности ролика, получены характеристики изменения радиальных напряжений в клиновидном пространстве при разных режимах работы прессующего механизма. Показано, что в незамкнутом клиновидном пространстве контактные напряжения в осевом направлении всегда распределены неравномерно. Эта неравномерность устраняется путем предотвращения бокового выдавливания. По измеренным реакциям со стороны ограничительных колец оценена сила сопротивления поперечной деформации комбикорма и соответственно активная сила бокового выдавливания. Значительная величина этой силы подтверждает существенность проблемы бокового выдавливания. На основании результатов тензометрических исследований установлена достоверность основных теоретических закономерностей процесса, обоснована необходимость торцевого ограничения клиновидного пространства дополнительными контактными поверхностями, обеспечивающими, главным образом, повышение производительности и снижение энергоемкости гранулятора.

Ключевые слова: пресс-гранулятор, кольцевая матрица, прессующий ролик, боковое выдавливание, замкнутое клиновидное пространство, ограничительное кольцо, тензометрический элемент.

i The problem of experimental determination of contact stresses in all zones of the wedge-shaped workspace of a pellet mill is relevant for perfecting the feed pelleting process, which is accompanied by the intense nonproductive lateral extrusion of the semi-finished material beyond the working surfaces of the ring die and press roller. In order to realize the structural and parametric synthesis of the pressing mechanism of the pellet mill on the unifying mathematical model of the process, a multilevel verification of its adequacy is required. The stress state behavior of the feed layer in the wedge-shaped workspace is studied insufficiently, therefore it is important to correctly describe the stress state parameters since the indicators characterizing the efficiency of the process depend directly on them. The method for research of the stress state in the conditions of the open and closed wedge-shaped workspace is proposed. This method allows obtaining the contact stresses distribution in the tangential direction and along the generating lines of the cylindrical operating parts and also determination of the axial stresses in a feed layer. To apply the method, a laboratory facility is created and designs of force-measuring operating parts – the tensometric press roller and replaceable restrictive ring – are developed. Characteristics of change of the radial stresses in the wedge-shaped workspace at different operating modes of the pressing mechanism are obtained using the measured stresses normal to the roller surface. It is shown that contact stresses in the axial direction in the open wedge-shaped workspace are always distributed unevenly. This unevenness is eliminated by preventing lateral extrusion. According to the measured reactions from the restrictive rings, the resistance force of the lateral strain of the feed and respectively, the active force of the lateral extrusion are estimated. The high value of these forces confirms the significance of the lateral extrusion problem. Based on the results of the strain-gauge testing, the main theoretical regularities of the process are validated, and the necessity of the butt restriction of the wedge-shaped workspace by additional contact surfaces is justified. The latter contributes to the increase of throughput capacity and the decrease in energy consumption of the pellet mill.

Keywords: pellet mill, ring die, press roller, lateral extrusion, closed wedge-shaped workspace, restrictive ring, tensometric element.

Для прессового гранулирования растительных материалов, в частности комбикормов, в настоящее время широко используются вальцово-матричные пресс-грануляторы с кольцевой матрицей [1–4]. Рабочий процесс в них осуществляется в условиях незамкнутого клиновидного пространства между цилиндрическими контактными поверхностями матрицы и прессующего ролика, где в результате проведенных авторами исследований было выявлено довольно интенсивное непроизводительное боковое выдавливание прессуемой массы [5], вследствие которого нарушаются оптимальные условия экструзии в фильерах матрицы, существенно снижается производительность и увеличивается энергоемкость гранулятора.

Целью настоящих исследований стало выявление причин бокового выдавливания, методов его устранения и связанных с ним недостатков в работе гранулятора на основе теоретически и экспериментально полученных силовых характеристик процесса.

С учетом необходимости предотвращения бокового выдавливания авторами разработана (на основе методов инженерной теории пластичности) комплексная математическая модель процесса с созданием в грануляторе торцевого ограничения клиновидного пространства дополнительными контактными поверхностями [6, 7]. В структуру прессующего механизма эти поверхности включены в виде двух цилиндрических ограничительных колец, жестко связанных с матрицей [8]. В рамках многоуровневой экспериментальной проверки комплексной модели важно установить адекватность ее подсистем, описывающих напряженное состояние прессуемого материала (внутреннюю характеристику многопараметрического процесса) на контактных поверхностях во всех рабочих полостях прессующего механизма, поскольку от параметров этого напряженного состояния функционально зависят основные выходные величины (производительность, энергоемкость и др.) процесса.

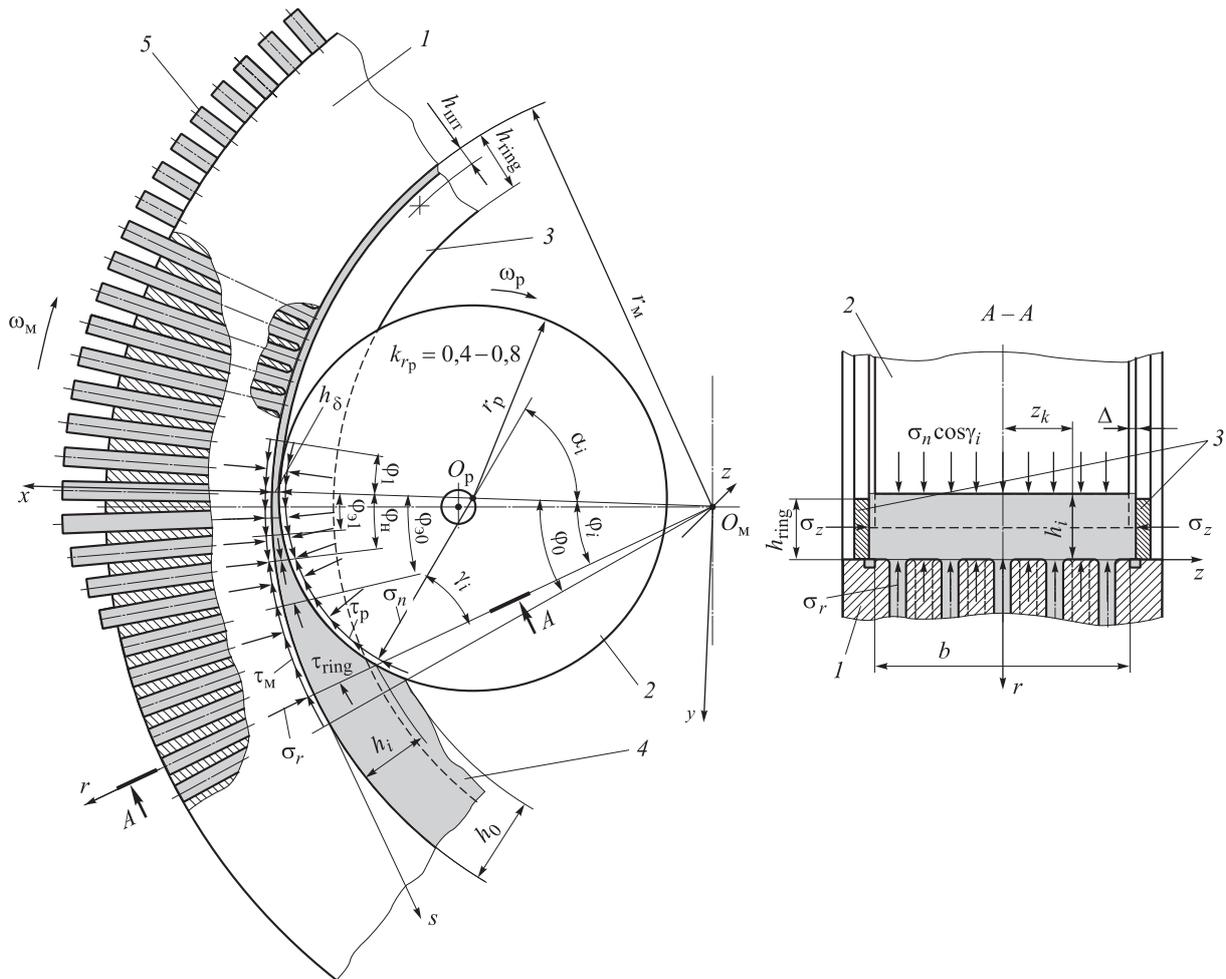


Рис. 1. Схема взаимодействия прессуемого материала с рабочими органами пресс-гранулятора в условиях торцевого ограничения клиновидного рабочего пространства:

1 — кольцевая матрица; 2 — прессующий ролик; 3 — ограничительное кольцо; 4 — слой прессуемого материала; 5 — гранулы; σ_r , σ_n , σ_z и τ_m , τ_p , τ_{ring} — контактные нормальные и касательные напряжения соответственно на поверхностях матрицы, прессующего ролика и ограничительных колец

Наиболее сложным является напряженно-деформированное состояние прессуемого материала в клиновидном пространстве гранулятора [2, 5, 9]. В то же время устойчивость прокатывающего действия и стабильность экструзии, нагрузка на рабочие органы, энергоёмкость прессования и эффективность процесса в целом определяются характером изменения контактных напряжений (в том числе на дополнительных контактных поверхностях) именно в клиновидном пространстве. Схема взаимодействия слоя прессуемого материала с контактными поверхностями рабочих органов (с обозначением геометрических параметров) представлена на рис. 1.

В цилиндрической системе координат (r, φ, z) произвольное i -е поперечное радиальное сечение клиновидного пространства определяется координатой φ_i , задающей угловое положение точек контактной поверхности мат-

рицы 1 радиусом r_m на промежутке $\varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_0$. Здесь φ_0 и φ_1 — угловые координаты начала и прекращения контакта слоя материала 4 с прессующим роликом 2 радиусом r_p . Произвольное k -е продольное сечение определяется осевой координатой z_k в пределах рабочей ширины b клиновидного пространства $(-b/2 \leq z \leq b/2)$.

Прессуемый комбикорм моделируется (с учетом его предварительного измельчения и гидротермической обработки) сплошной квази-изотропной уплотняемой средой, обладающей свойствами упругопластического деформируемого твердого тела с изменяющимся в зависимости от гидростатического напряжения σ_c пределом текучести сдвига τ_s .

Слой контактирует с продуктом, запрессованным в фильеры матрицы, а также с комбикормом, удерживаемым неровностями ролика. Затраты энергии на внутренние сдвиги в прессуемом материале на контактной поверхности

меньше, чем на внешнее скольжение. Поэтому считаем, что полные контактные касательные напряжения τ_m и τ_p на поверхностях матрицы и ролика в зонах отставания ($\varphi_{\text{э}0} \leq \varphi \leq \varphi_0$) и опережения ($\varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_{\text{э}1}$) равны величине $\tau_s(\sigma_c)$. Здесь $\varphi_{\text{э}0}$ и $\varphi_{\text{э}1}$ — угловые координаты верхней и нижней границ зоны экструзии. В зоне экструзии ($\varphi_{\text{э}1} \leq \varphi \leq \varphi_{\text{э}0}$) напряжения τ_m и τ_p также связаны с пределом текучести комбикорма и зависят от его значений в граничных сечениях этой зоны. При боковом выдавливании векторы τ_m и τ_p раскладываются на тангенциальные и осевые составляющие, но не превышают по модулю величину $\tau_s(\sigma_c)$. Тогда для установления связи между нормальными напряжениями в комбикорме вблизи контактных поверхностей (при усредненной плотности слоя) примем цилиндрические условия пластичности.

Точное условие пластичности для плоского деформированного состояния в замкнутом клиновидном пространстве, записанное для контактной поверхности в форме, предложенной Е.П. Унковым, имеет вид

$$\frac{\sigma_\varphi - \sigma_r}{2\tau_s(\sigma_c)} = \pm \sqrt{1 - \frac{\tau_k^2}{\tau_s(\sigma_c)^2}}, \quad (1)$$

где σ_r — радиальное напряжение в комбикорме и, соответственно, контактное радиальное напряжение; σ_φ — нормальное тангенциальное напряжение в слое; τ_k — полное контактное касательное напряжение на поверхности цилиндрического рабочего органа.

Вследствие стеснения поперечной деформации нормальные осевые напряжения σ_z в комбикорме, а значит, и нормальные напряжения на поверхностях ограничительных колец 3 (см. рис. 1), находятся по формуле

$$\sigma_z = 0,5(\sigma_\varphi + \sigma_r). \quad (2)$$

При $\tau_k \rightarrow \tau_s(\sigma_c)$ с учетом формулы (2) из выражения (1) для зон отставания и опережения следует, что:

$$\sigma_\varphi - \sigma_r = 0; \quad (3)$$

$$\sigma_r = \sigma_z = \sigma_\varphi = \sigma_c. \quad (4)$$

Для зоны экструзии равенства (3) и (4) являются приближенными.

Аналогичное условие пластичности для объемного деформированного состояния в незамкнутом клиновидном пространстве при $\tau_k \rightarrow \tau_s(\sigma_c)$ приводится к виду

$$(\sigma_\varphi - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_\varphi)^2 = 0, \quad (5)$$

что справедливо только при условии (4). Здесь σ_z — внутреннее сжимающее напряжение. Будем полагать, что когда торцевое ограничение слоя отсутствует, условие (4) выполняется вблизи контактных поверхностей в пределах каждого продольного сечения при изменении по ширине b тангенциальных составляющих контактных сил трения.

Решение полученного в работе [6] дифференциального уравнения равновесия комбикорма в клиновидном пространстве с учетом выражений (1)–(5) и экспоненциального характера изменения предела текучести $\tau_s(\sigma_c)$ позволяет представить распределение радиальных напряжений σ_r в тангенциальном s и осевом z направлениях в виде функций

$$\sigma_r(\varphi, z_k) = -\frac{1}{\beta} \ln \left(1 + \operatorname{sgn} \tau \beta \tau_{s0} \int_{c_1}^{\varphi} Z(\varphi, z_k) d\varphi \right), \quad (6)$$

$$\varphi \in [0; \varphi_{\text{э}1k}] \cup [\varphi_{\text{э}0k}; \varphi_0];$$

$$\sigma_r(\varphi, z_k) = \sigma_{l\Sigma} - \tau_{s0} \exp(\beta \sigma_{l\Sigma}) \times$$

$$\times \int_{c_2}^{\varphi} (\varphi - \varphi_{\text{нк}}) Z(\varphi, z_k) \left\{ (\varphi_{\text{э}0k} - \varphi_{\text{э}1k}) - \operatorname{sgn} \tau \left\{ \varphi_{\text{нк}} - \right. \right. \quad (7)$$

$$\left. \left. - 0,5[\varphi_{\text{э}0k}(1 - \operatorname{sgn} \tau) + \varphi_{\text{э}1k}(1 + \operatorname{sgn} \tau)] \right\} \right\}^{-1} d\varphi,$$

$$\varphi \in [\varphi_{\text{э}1k}; \varphi_{\text{э}0k}],$$

где τ_{s0} — предел текучести сдвига комбикорма под действием атмосферного давления; β — коэффициент всестороннего давления комбикорма; $Z(\varphi, z)$ — функция конструктивных параметров прессующего механизма, учитывающая фактор трения; $\sigma_{l\Sigma}$ — полное сопротивление фильер (давление экструзии); $\varphi_{\text{н}}$ — угловая координата нейтрального сечения зоны экструзии; $\operatorname{sgn} \tau = -1$ — для зоны опережения и примыкающей к ней части зоны экструзии, то есть на отрезке $[0; \varphi_{\text{нк}}]$, $\operatorname{sgn} \tau = +1$ — для зоны отставания и примыкающей к ней части зоны экструзии, то есть на отрезке $[\varphi_{\text{нк}}; \varphi_0]$.

В формулах (6) и (7) не рассматривается упругая область ($\varphi_1 \leq \varphi \leq 0$) зоны опережения, а нормальные напряжения в сечении минимального зазора h_δ приближенно приняты равными нулю, что допустимо в отношении растительных материалов с выраженными пластическими свойствами.

Нижние пределы интегрирования c_1 и c_2 в формулах (6) и (7) принимают значения

$$c_1 = 0,5[\varphi_0(1 + \operatorname{sgn} \tau)];$$

$$c_2 = 0,5[\varphi_{\text{э}0k}(1 + \operatorname{sgn} \tau) + \varphi_{\text{э}1k}(1 - \operatorname{sgn} \tau)].$$

Функция $Z(\varphi, z)$ определяется выражением (с учетом того, что контактные поверхности матрицы и ограничительного элемента взаимно перпендикулярны):

$$Z(\varphi, z) = \left(1 + \frac{2\Delta}{b}\right) \frac{r_m}{h(\varphi)} m_m(z) + [\operatorname{tg}^2 \gamma(\varphi) + 1] \times \\ \times \left[\frac{r_m}{h(\varphi)} - 1\right] m_p(\varphi, z) + \\ + \frac{2}{bh(\varphi)} [r_m h_{\text{butt}}(\varphi) - 0,5h_{\text{butt}}^2(\varphi)] m_{\text{ring}}, \quad (8)$$

где h — радиальная высота клиновидного пространства; γ — угол между касательными к окружностям контактных поверхностей матрицы и ролика в сечении высотой h ; h_{butt} — радиальная высота торцевой контактной поверхности слоя материала; m_m , m_p , m_{ring} — коэффициенты фактора трения для контактных поверхностей матрицы, ролика и ограничительных колец; Δ — торцевой зазор при установке ограничительных колец.

Для расчета параметров h и γ установлены следующие зависимости:

$$h(\varphi) = r_m \left[1 - \sqrt{k_{r_p}^2 - (k_{r_m}^{-1} \sin \varphi)^2} - k_{r_m}^{-1} \cos \varphi\right]; \quad (9)$$

$$\gamma(\varphi) = \arcsin(k_{r_p}^{-1} k_{r_m}^{-1} \sin \varphi), \quad (10)$$

где $k_{r_p} = r_p/r_m$ — относительный радиус ролика; $k_{r_m} = [1 - k_{r_p} - h_s/r_m]^{-1}$ — отношение радиуса матрицы к межосевому расстоянию $O_m O_p$.

Параметр h_{butt} зависит от соотношения радиальной высоты ограничительного кольца h_{ring} и начальной радиальной высоты слоя h_0 :

$$h_{\text{butt}}(\varphi) = \begin{cases} h(\varphi) & \text{при } (h_{\text{ring}}/h_0 \geq 1) \wedge (\varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_0) \\ & \text{и } (h_{\text{ring}}/h_0 < 1) \wedge (\varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_{\text{ring}}); \\ h_{\text{ring}} & \text{при } (h_{\text{ring}}/h_0 < 1) \wedge (\varphi_{\text{ring}} \leq \varphi \leq \varphi_0); \\ 0 & \text{при } h_{\text{ring}} = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Угол образования замкнутого клиновидного пространства φ_{ring} , входящий в выражение (11), рассчитывается по формуле

$$\varphi_{\text{ring}} = \arccos \left\{ 0,5k_{r_m} \left(1 - \frac{h_{\text{ring}}}{r_m}\right)^{-1} \times \right. \\ \left. \times \left[\left(1 - \frac{h_{\text{ring}}}{r_m}\right)^2 - k_{r_p}^2 + \frac{1}{k_{r_m}^2} \right] \right\}. \quad (12)$$

Через коэффициенты m_m и m_p учитывается изменение величины тангенциальных составляющих напряжений τ_m и τ_p в направлении z . Для незамкнутого клиновидного пространства, исходя из коллинеарности векторов τ_m , τ_p и векторов относительных скоростей при контактного пластического течения комбикорма и из равенства тангенциальных и осевых составляющих этих скоростей вблизи свободных поверхностей слоя, примем

$$m_m(z) = m_p(z) = \cos\left(\frac{\pi z}{2b}\right). \quad (13)$$

В замкнутом клиновидном пространстве при полном ограничении бокового выдавливания $m_m(z) = m_p(z) = 1$. В случае неполного перекрытия слоя материала по высоте ($h_{\text{ring}}/h_0 < 1$) значение m_p зависит также от φ . Коэффициент m_{ring} отражает изменение по высоте h_{butt} касательных напряжений τ_{ring} на поверхностях ограничительных колец. Полагая, что на уровне контактной поверхности матрицы $\tau_{\text{ring}} = \tau_m$, а на границе, где прекращается контакт колец со слоем, $\tau_{\text{ring}} = 0$, примем $m_{\text{ring}} = 0,5$.

Координаты границ зоны экструзии $\varphi_{\text{э}0k}$ и $\varphi_{\text{э}1k}$ при известном значении $\sigma_{l\Sigma}$ рассчитываются численно по формуле (6) путем их подстановки в верхний переменный предел интегрирования. При этом

$$\sigma_r(\varphi_{\text{э}0k}, z_k) = \sigma_r(\varphi_{\text{э}1k}, z_k) = \sigma_{l\Sigma}.$$

Функцию $Z(\varphi, z)$, представленную выражением (8), можно заменить аппроксимирующей экспоненциальной функцией в диапазоне $0 \leq \varphi \leq \varphi_0$:

$$Z(\varphi, z_k) = A_k \exp(B_k \cdot \varphi) + C_k, \quad (14)$$

где A , B , C — коэффициенты аппроксимации.

В результате решения уравнения (6) с учетом выражения (14) получены следующие формулы для расчета $\varphi_{\text{э}0k}$ и $\varphi_{\text{э}1k}$:

$$\varphi_{\text{э}0k} = \varphi_0 + \frac{A_k}{B_k C_k} \exp(B_k \varphi_0) + \\ + \frac{1}{\beta \tau_{s0} C_k} (\exp(-\beta \sigma_{l\Sigma}) - 1) - \\ - \frac{1}{B_k} \operatorname{LambertW} \left\{ \frac{A_k}{C_k} \exp \left[B \varphi_0 + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{A_k}{C_k} \exp(B_k \varphi_0) + \frac{B_k}{\beta \tau_{s0} C_k} (\exp(-\beta \sigma_{l\Sigma}) - 1) \right] \right\}; \quad (15) \\ \varphi_{\text{э}1k} = \frac{A_k}{B_k C_k} + \frac{1}{\beta \tau_{s0} C_k} (1 - \exp(-\beta \sigma_{l\Sigma})) -$$

$$-\frac{1}{B_k} \text{LambertW} \left\{ \frac{A_k}{C_k} \times \exp \left[\frac{A_k}{C_k} + \frac{B_k}{\beta \tau_{s0} C_k} (1 - \exp(-\beta \sigma_{l\Sigma})) \right] \right\}. \quad (16)$$

Для определения координаты нейтрального сечения $\varphi_{нк}$ радиальные напряжения, рассчитываемые по формуле (7) при $\text{sgn} \tau = -1$ и $\text{sgn} \tau = +1$, приравниваются (неизвестная $\varphi_{нк}$ подставляется в верхний переменный предел интегрирования). Полученное уравнение решается численно. При использовании функции (14) это уравнение при найденных значениях $\varphi_{э0к}$ и $\varphi_{э1к}$ преобразовывается в уравнение (с коэффициентами аппроксимации a) вида

$$\frac{(a_{1k}\varphi_{нк} + a_{2k}) \exp(a_{3k}\varphi_{нк}) + a_{4k}\varphi_{нк}^3}{a_{8k}\varphi_{нк}^2 + a_{9k}\varphi_{нк} + a_{10k}} + \frac{a_{5k}\varphi_{нк}^2 + a_{6k}\varphi_{нк} + a_{7k}}{a_{8k}\varphi_{нк}^2 + a_{9k}\varphi_{нк} + a_{10k}} = 0. \quad (17)$$

В формуле (7) учитывается изменение величины контактных касательных напряжений в зоне экструзии (от максимальных значений на ее границах до нуля в нейтральном сечении) и смена их направления при переходе нейтрального сечения. При известном значении $\varphi_{нк}$ по формуле (7) можно определить величину максимальных радиальных напряжений.

Таким образом, по величине напряжений σ_r при установленном характере напряжений $\tau_m, \tau_p, \tau_{ring}$ и условию (4) оцениваются и другие параметры напряженного состояния. В незамкнутом клиновидном пространстве при $h_{ring} = 0$ поперечная деформация комбикорма обусловлена схемой его напряженно-деформированного состояния, при котором возникают силы бокового выдавливания. Из-за бокового выдавливания, как следует из анализа функций (6) и (7) с учетом (4), (8)–(17), контактные напряжения изменяются не только в тангенциальном направлении, но и по ширине матрицы и ролика. При установке же торцевых ограничительных элементов боковые перемещения прессуемой массы отсутствуют, а возникающие в ней напряжения σ_z уравновешиваются реакциями со стороны контактных поверхностей этих элементов, что обеспечивает выравнивание напряжений σ_r и других характеристик в направлении z . Воспринимаемые кольцами нормальные силы соответствуют силе бокового выдавливания в незамкнутом клиновидном пространстве.

Чтобы проверить адекватность представленных выше положений и получить более полную сравнительную характеристику процесса прессования при $h_{ring} = 0$ и $h_{ring} \neq 0$, экспериментально определены распределения контактных радиальных напряжений в клиновидном пространстве гранулятора, также измерены нормальные напряжения на поверхностях торцевых ограничительных элементов.

Предварительно проведен анализ известных методов измерения локальных контактных напряжений вращающимися цилиндрическими рабочими органами в условиях реального технологического процесса [10, 11]. Проанализированы недостатки методов и конструкций измерительных устройств, реализованных непосредственно при прессовании рассыпных материалов — в валковых прессах [3, 12] и грануляторах [1, 13].

Экспериментальная установка, представленная на рис. 2, разработана авторами [14, 15] на базе промышленного малогабаритного гранулятора ПГМ-05 с электродвигателем 3, установленной на планшайбе приводной кольцевой матрицей 1 и размещенным внутри нее прессующим роликом 2, закрепленным на консольном участке главной оси 10 гранулятора. Изготовлен набор из нескольких комплектов сменных ограничительных колец. Установка включала также шнековый питатель-дозатор. Управление приводом гранулятора осуществлялось с помощью преобразователя частоты Toshiba VF-S11-4011PL или VF-AS1-4220PL (11 или 15 кВт, 1 440 об/мин в зависимости от мощности установленного электродвигателя), подключенного через конвертор к персональному компьютеру.

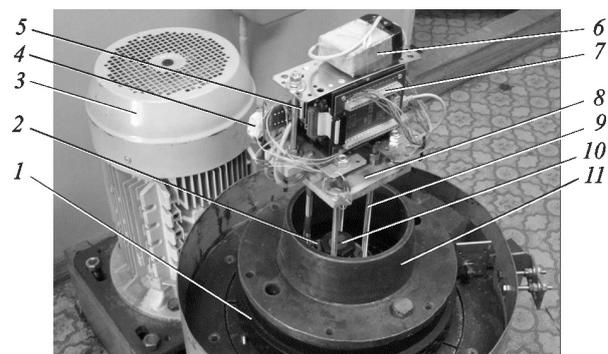


Рис. 2. Экспериментальная установка прессового гранулирования (крышка прессующей секции снята):

- 1 — кольцевая матрица; 2 — прессующий ролик с силоизмерительным устройством; 3 — электродвигатель;
- 4, 6 — автономные блоки питания; 5 — предварительный усилитель; 7 — аналого-цифровой преобразователь с автономным регистратором сигналов; 8 — платформа;
- 9 — стойки; 10 — главная ось; 11 — подающий конус

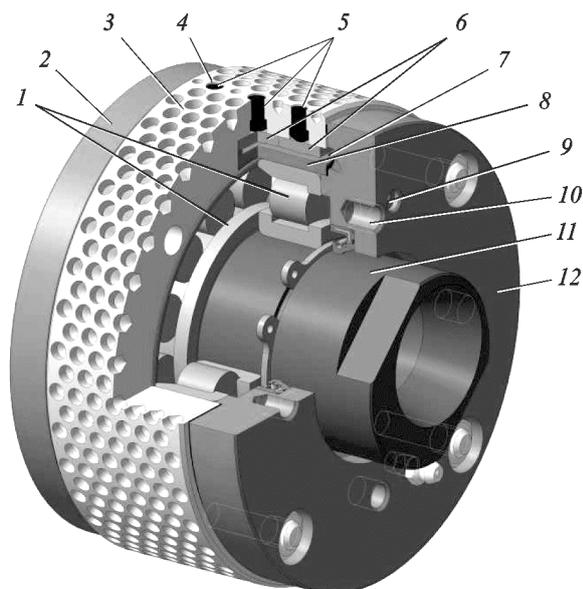


Рис. 3. Силоизмерительный прессующий ролик пресс-гранулятора:

- 1 — подшипники; 2, 12 — верхняя и нижняя торцевые крышки; 3 — цилиндрическая обечайка с несквозной перфорацией; 4 — радиальный канал под несущий штифт; 5 — несущие штифты; 6 — тензометрические пластины с тензорезисторами; 7 — продольный паз в обечайке; 8 — опора тензопластин; 9 — канал для вывода проводников от тензорезисторов; 10 — резьбовые отверстия для крепления стоек; 11 — полая эксцентриковая ось

В качестве силоизмерительного рабочего органа для определения контактных радиальных напряжений был использован ролик разработанной авторами конструкции (рис. 3) [14–16], состоящий из полой эксцентриковой оси 11 с подшипниками 1, цилиндрической обечайки 3, торцевых крышек 2 и 12 и силоизмерительного устройства с тензометрическими элементами. Рабочая поверхность обечайки с целью увеличения втягивающих касательных сил имела неровности в виде несквозной перфорации.

Для размещения силоизмерительного устройства в обечайке выполнен внутренний продольный сквозной паз 7 с плоским основанием. В основании паза по его длине выполнены три сквозных ступенчатых цилиндрических радиальных отверстия (канала) 4. Оси каналов находятся в разных продольных сечениях обечайки, совпадают с продольной плоскостью симметрии паза и перпендикулярны его основанию. Силоизмерительное устройство образовано тремя двухопорными тензометрическими пластинами 6 (толщиной 0,003 м из стали 60С2А ГОСТ 14959–79), тремя несущими штифтами 5 (из стали У10 ГОСТ 1435–99 с термообработкой), а также общей для всех тензопластин опорой 8. При этом каждый несущий штифт установлен с

кольцевым зазором 0,02...0,05 мм в соответствующий радиальный канал и опирается сферической головкой на тензопластину с наклеенным на ее поверхность, обращенную к опоре, активным тензорезистором (2ФКП-5-200). Несущие штифты были изготовлены с диаметром площадок рабочих торцов 3 и 5 мм. Рабочие торцы утоплены на уровень оснований неровностей обечайки. Используя обечайки, отличающиеся расположением по длине паза каналов под несущие штифты, увеличивали число экспериментальных продольных сечений.

Для обеспечения работы силоизмерительного прессующего ролика разработана информационно-измерительная система, компоненты которой изображены на рис. 2. Каждое тарированное тензозвено силоизмерительного устройства прессующего ролика 2 по мостовой схеме через двухканальный предварительный усилитель 5 (ZET 410 — ЗАО «ЭТМС») было подключено к дифференциальному измерительному каналу модуля многоканального аналого-цифрового преобразователя 7 (ZET 220 — ЗАО «ЭТМС») со встроенным флэш-накопителем. Усилитель и модуль аналого-цифрового преобразователя (АЦП) имели автономные блоки питания 4 и 6. Питание тензомостов осуществлялось от усилителя с постоянным напряжением 5 В. Для одновременной работы всех трех тензоэлементов использовали два усилителя ZET 410. Аппаратура была вынесена за пределы подающего конуса 11 и установлена на платформе 8, закрепленной на верхней крышке ролика на стойках 9. Модуль АЦП работал в качестве автономного регистратора сигналов и цифрового токосъемника, записывая на флэш-накопитель оцифрованные сигналы с тензомостов (частота дискретизации 2 000...4 000 Гц). Ролик был оснащен также отметчиком на осциллограммах положения минимального зазора h_{δ} . В качестве отметчика использовался вихретоковый преобразователь AP2100A-V (производства ООО «ГлобалТест») с драйвером D210A-V и пробником AE050, взаимодействующим с тахометрической меткой в плоскости сечения h_{δ} . Датчик подключался к отдельному измерительному каналу модуля АЦП.

Таким образом, в компактном силоизмерительном устройстве ролика функции элементов, передающих усилия, и функции тензометрических элементов конструктивно разделены. Применение тензопластин, работающих на изгиб (что является оптимальным при измерении сил до 5 кН), и несущих штифтов, обладающих достаточной продольной устойчивостью, обеспе-

чивает необходимую точность измерения радиальных напряжений и повышает качество результатов определения силовой характеристики процесса. Конструкция позволяет определять изменение давления прессования как в тангенциальном, так и осевом направлениях.

Применение разработанной конструкции силоизмерительного ролика не ограничивается изучением процесса гранулирования комбикормов [14–16]. Так, данная разработка была использована и для определения реологических параметров древесных опилок.

Для измерения нормальных осевых напряжений в слое комбикорма в замкнутом клиновидном пространстве и определения нагрузки на торцевые ограничительные элементы авторами разработана конструкция силоизмерительного ограничительного кольца, изображенная на рис. 4.

В верхнее сменное ограничительное кольцо 3 было встроено тензозвено в виде тензопластины 4 с наклеенным тензорезистором. Тензозвено устанавливалось в специальной опоре 1, прикрепленной к ограничительному кольцу крепежными болтами 2 со стороны подающего конуса. Измеряемое усилие передавалось на тензопластину, как и в силоизмерительном ролике, сферической головкой несущего штифта 5. Несущий штифт свободно перемещался под действием нагрузки в канале 6, перпендикулярном контактной поверхности ограничительного кольца. Относительно этой поверхности рабочий торец несущего штифта утоплен на расстояние 0,02...0,03 мм.

Торцевое ограничение слоя со стороны планшайбы гранулятора создавалось нижним сменным ограничительным кольцом 7. Модули ZET 410 и ZET 220, обеспечивающие работу тен-

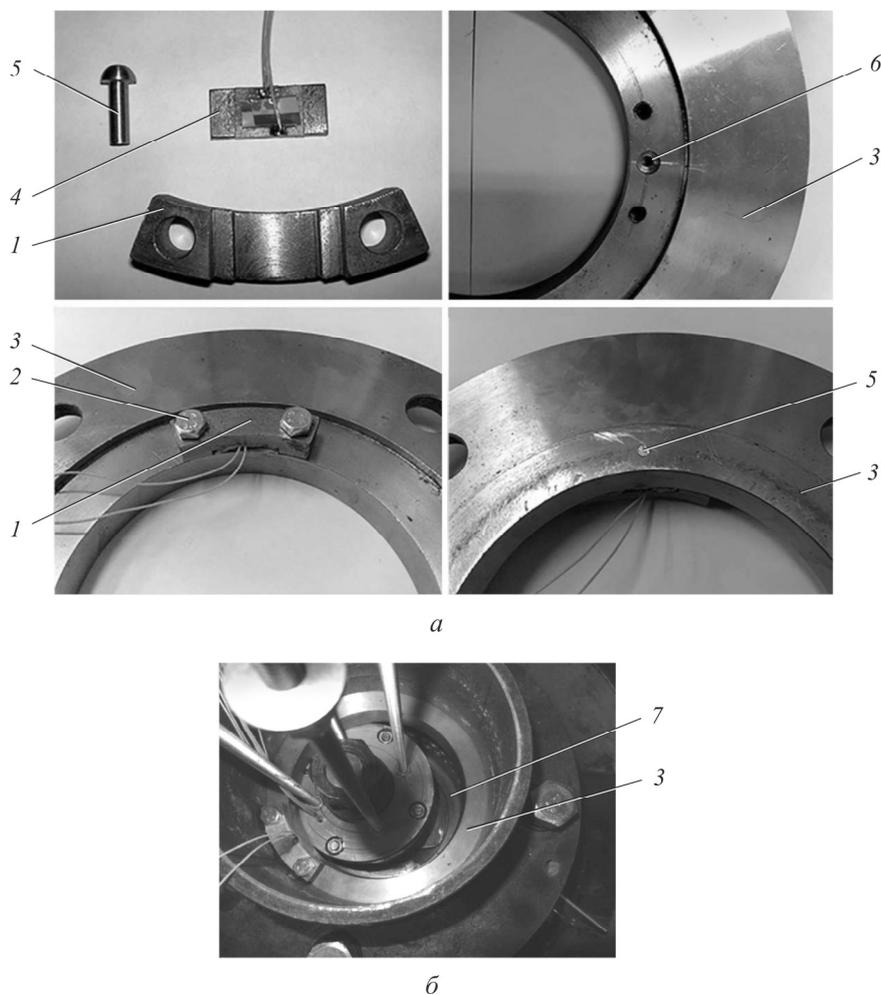


Рис. 4. Устройство (а) силоизмерительного ограничительного кольца и его размещение (б) в прессующей секции:

1 — опора тензопластины; 2 — крепежный болт; 3 — верхнее сменное силоизмерительное ограничительное кольцо; 4 — тензометрическая пластина с тензорезистором; 5 — несущий штифт; 6 — канал несущего штифта; 7 — нижнее сменное ограничительное кольцо

озвона, закреплялись на планшайбе гранулято-ра под кожухом прессующей секции. Измерение реакций позволяет установить действительный характер связи осевых и радиальных напряжений и определить силы, обуславливающие боковое выдавливание комбикорма при отсутствии ограничительных колец.

Измерительные каналы модулей АЦП ограничительного кольца и ролика были синхронизированы. При обработке реализаций процесса на осциллограммах выбирались участки со стабильной силовой характеристикой, изменяющейся циклически, и постоянным коэффициентом скольжения ε ролика относительно матрицы. Величину ε рассчитывали через фактические угловые скорости ролика ω_p и матрицы ω_m :

$$\varepsilon = 1 - k_{rp} \left(1 - \frac{h_\delta}{r_m} \right)^{-1} \frac{\omega_p}{\omega_m}. \quad (18)$$

Значения ω_p и ω_m определялись через периоды вращения силоизмерительных устройств, взятые из осциллограмм контактных напряжений, а также измерялись фототахометром АТТ-6002 — «АКТАКОМ».

Погрешности метода штифтовых датчиков учитывались в соответствии с рекомендациями, предложенными в работе [11].

В результате обработки осциллограмм (средствами ZETLab, PTC Mathcad) с использованием тарировочных кривых тензоэлементов, данных о положении минимального зазора на осциллограммах и об угловых скоростях рабочих органов были получены экспериментальные диаграммы:

- изменения нормальных напряжений σ_n на поверхности ролика в пределах k -го сечения, в котором установлен несущий штифт, в зависимости от координаты α , задающей угловое положение точек этой поверхности относительно оси ролика; обрабатывая данные одновременно во всех экспериментальных продольных сечениях, строили трехмерное распределение напряжений σ_n ;

- изменения осевых напряжений σ_z на торцевой поверхности ограничительного кольца (на уровне $h_{шт}$ расположения оси несущего штифта относительно контактной поверхности матрицы) в зависимости от координаты φ ; диаграммы, полученные при разных значениях $h_{шт}$, приводили к поверхности матрицы относительно окружной координаты $(\varphi \cdot r_m)$.

В соответствии с выражениями (6)–(11) и (15)–(17) напряжения поперечных сечения и границы зон клиновидного пространства зада-

ны в системе координат (см. рис. 1), связанной с матрицей. Через напряженное состояние на ее контактной поверхности определяются основные выходные параметры процесса [6]. Для сопоставления теоретических и экспериментальных данных измеренные напряжения σ_n (радиальные относительно поверхности ролика) пересчитывали в напряжения σ_r , перестраивая диаграммы относительно координат φ или $(\varphi \cdot r_m)$.

Перевод координаты α в координату φ для i -го радиального сечения осуществляется при любой ε по формуле

$$\varphi_i(\alpha_i) = \alpha_i - \arcsin \left\{ \sin \alpha_i \left[(1 + k_{rp} k_{rm})^2 - 4k_{rp} k_{rm} \sin^2(0,5\alpha_i) \right]^{-0,5} \right\}. \quad (19)$$

Силовая характеристика строится на промежутке $\varphi_{1k} \leq \varphi_i \leq \varphi_{0k}$. Параметр h_{0k} принимается за высоту фактически захватываемого слоя.

Перестроение эпюр в координатах φ с поверхности ролика на поверхность матрицы проводится по следующим зависимостям:

$$(\sigma_r)_{i,k} = (\sigma_n)_{i,k} + \frac{-1}{\beta} \text{LambertW} \left(-\text{sgn} \tau m_{pk} \times \right. \\ \left. \times \beta \tau_{s0} \frac{\exp[\beta(\sigma_n)_{i,k}]}{\text{ctg} \gamma_i(\varphi_i)} \right); \quad (20)$$

$$(\sigma_r)_{i,k} = (\sigma_n)_{i,k} + m_{pk} \tau_{s0} \exp(\beta \sigma_{l\Sigma}) \text{tg} \gamma_i(\varphi_i) \times \\ \times (\varphi_i - \varphi_{nk}) \left\{ (\varphi_{\varepsilon 0k} - \varphi_{\varepsilon 1k}) - \text{sgn} \tau \left\{ \varphi_{nk} - \right. \right. \\ \left. \left. - 0,5 [\varphi_{\varepsilon 0k} (1 - \text{sgn} \tau) + \varphi_{\varepsilon 1k} (1 + \text{sgn} \tau)] \right\} \right\}^{-1}. \quad (21)$$

Выражение (20) справедливо для зон опережения и отставания, выражение (21) — для зоны экструзии. Здесь используются экспериментальные значения φ_{0k} , $\varphi_{\varepsilon 0k}$, φ_{nk} , $\varphi_{\varepsilon 1k}$ и φ_{1k} . Умножив вторые слагаемые в формулах (20) и (21) на величину $\text{ctg} \gamma_i(\varphi_i)$, получим экспериментальную оценку тангенциальных составляющих напряжений τ_p при условии, что характер их распределения обоснован.

Массивы $(\sigma_r)_{i,k}$ путем двумерной сплайн-аппроксимации представляются в виде непрерывных функций $\sigma_r(\varphi, z)$, $\sigma_r[(\varphi \cdot r_m), z]$. По этим функциям рассчитываются средние радиальные напряжения в поперечных и продольных сечениях. Двойным интегрированием функций в пределах площади входного сечения

единичной фильеры, привязанной к угловым и осевым координатам, может быть определена радиальная сила, действующая на гранулу в этой фильере со стороны прессуемого слоя.

На рис. 5 представлена экспериментальная диаграмма распределения радиальных напряжений, характерная для незамкнутого клиновидного пространства гранулятора.

Положение несущих штифтов при использовании трех обечаек со смещением радиальных каналов задано девятью осевыми координатами: $z_1 = 0$; $z_{2/2'} = \pm 0,005$ м; $z_{3/3'} = \pm 0,01$ м; $z_{4/4'} = \pm 0,014$ м; $z_{5/5'} = \pm 0,018$ м.

Диаграмма получена при гранулировании комбикорма № КК-60 с начальной влажностью 16 %, температурой 30 °С и модулем частиц 1,061 мм при следующих значениях параметров прессующего механизма: $r_m = 0,0875$ м; $k_{rp} = 0,78$; $b = 0,044$ м; $\bar{h}_s = 0,0004$ м; $k_{rm} = 4,58$; $\omega_m = 20$ рад/с. Диаграмма соответствует силовой характеристике, полученной на матрицах с разным диаметром формующей полости фильер (0,01; 0,008 и 0,0048 м), но с одинаковой их полной относительной длиной $k_{l\Sigma} = 7,54$. Здесь при мощности 10,5 кВт, требуемой на

гранулирование, замеренная производительность пресса ($\varepsilon = 0,13$) составляет 0,083 кг/с.

Давление экструзии $\sigma_{l\Sigma} = 34,3$ МПа (см. рис. 5, плоскость 2) рассчитано по модели [7] с учетом значений реологических параметров комбикорма, определенных отдельно на устройстве с тензометрической сменной фильерой (на нем же установлена адекватность модели [7]). Параметры предела текучести: $\tau_{s0} = 0,97$ МПа; $\beta = 0,0173$ МПа⁻¹. Параметры коэффициента контактного трения $\tau_0 = 0,63$; $f_1 = 0,027$; $f_2 = 0,00066$ МПа⁻¹.

Участки эпюры 1, расположенные справа и слева ниже плоскости 2 (см. рис. 5), отражают изменение напряжений соответственно в зонах отставания и опережения. Часть эпюры 1 выше плоскости 2 характеризует распределение напряжений в зоне экструзии.

Из диаграммы видно, что в незамкнутом клиновидном пространстве в направлении z ярко выражена неравномерность распределения радиальных напряжений. Во всех продольных сечениях характер изменения напряжений одинаковый (см. рис. 5, семейство кривых 3 и изолинии 5), но их максимальные и средние

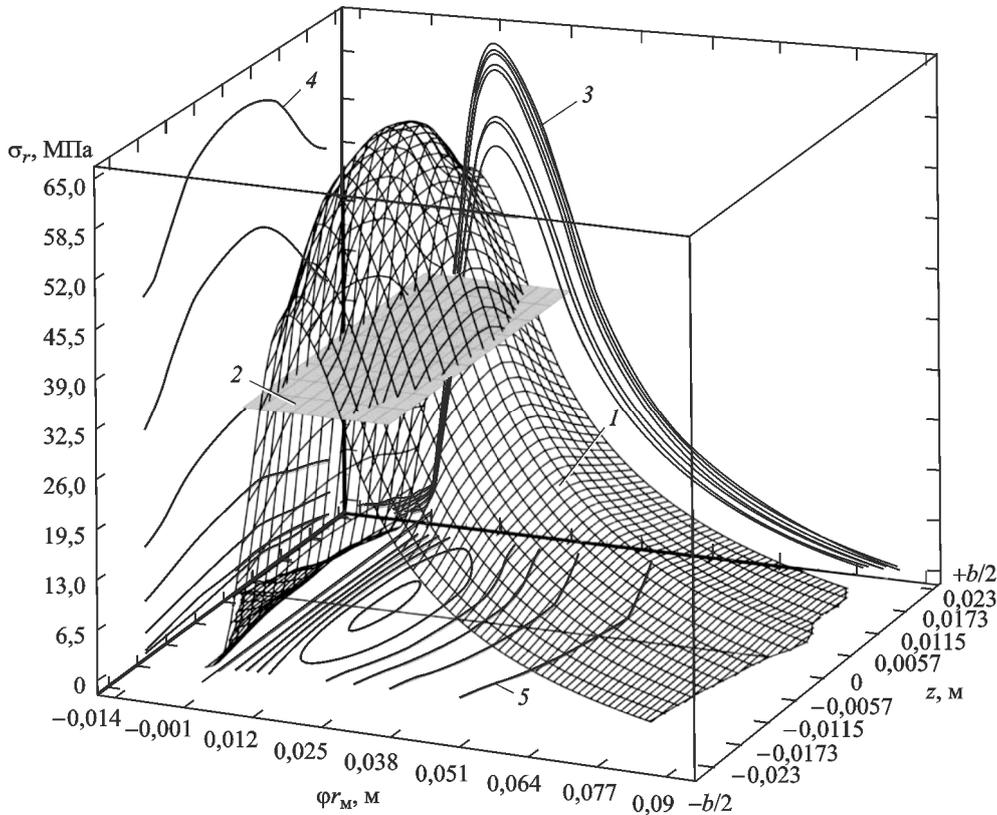


Рис. 5. Диаграмма распределения контактных радиальных напряжений в незамкнутом клиновидном пространстве (экспериментальные данные): 1 — поверхность $\sigma_r[(\varphi \cdot r_m), z]$; 2 — плоскость $\sigma_{l\Sigma} = 34,3$ МПа; 3 и 4 — семейства кривых изменения напряжений соответственно в тангенциальном направлении в разных продольных сечениях и в осевом направлении в разных поперечных сечениях клиновидного пространства; 5 — изолинии давления прессования

значения в крайних сечениях соответственно на 22,4 % и 19,2 % ниже по сравнению с центральным сечением. Разница значений напряжений в середине и на краях матрицы в зоне экструзии в абсолютном выражении существенно выше, чем в зоне отставания (см. рис. 5, семейство кривых 4 и изолинии 5). Однако коэффициент неравномерности напряжений (коэффициент вариации) по ширине в зоне отставания с интенсивным боковым выдавливанием составляет в среднем 17,5 %, а в нейтральном сечении зоны экструзии — 10,2 %. Окружная протяженность зоны экструзии вблизи сечений $z = \pm b/2$ на 35,8 % меньше, чем в сечении $z = 0$. Это обуславливает неодинаковую пропускную способность разных рядов фильер матрицы, неодинаковую прочность гранул в них, а также объясняет негативную тенденцию [17] к возможной блокировке крайних рядов фильер (недостаточное их перекрытие зоной экструзии или отсутствие последней). Вышеизложенное имеет место при почти равномерном слое ($\bar{h}_0 = 0,01$ м, среднее абсолютное отклонение 0,0004 м). Это подтверждает, что основной причиной неравномерности контактных радиальных и, очевидно, внутренних осевых напряжений в направлении z является боковое выдавливание, в результате которого возника-

ют осевые составляющие напряжений τ_m и τ_p , увеличивающиеся по мере удаления от сечения $z = 0$ (при уменьшении тангенциальных составляющих).

Распределение радиальных напряжений в экспериментах с замкнутым клиновидным пространством ($h_{ring}/h_0 > 1$) равномерно по ширине рабочих органов. Анализируя приведенные на рис. 6 усредненные по ширине b силовые характеристики (кривые 1 и 2), полученные с ограничительными кольцами ($h_{ring} = 0,015$ м, $\Delta = 0,0015$ м), и усредненную по ширине эпюру (кривая 3), которая соответствует диаграмме на рис. 5, отмечаем следующее. При том же значении $\bar{h}_0 = 0,01$ м создаваемое напряженное состояние (см. рис. 6, кривая 1) обеспечивает увеличение окружной протяженности зоны экструзии в среднем на 20,8 %, что соответствует повышению производительности с 0,083 до 0,118 кг/с при мощности на гранулирование 11,1 кВт (с учетом влияния τ_{ring}) и $\varepsilon = 0,08$ (проскальзывание уменьшается). Таким образом, снижение энергоемкости предложенной авторами конструкции гранулятора с ограничительными кольцами составляет 25,6 %. Та же производительность (0,083 кг/с) обеспечивается при меньшей высоте захватываемого слоя (см. рис. 6, кривая 2) и меньших затратах энергии

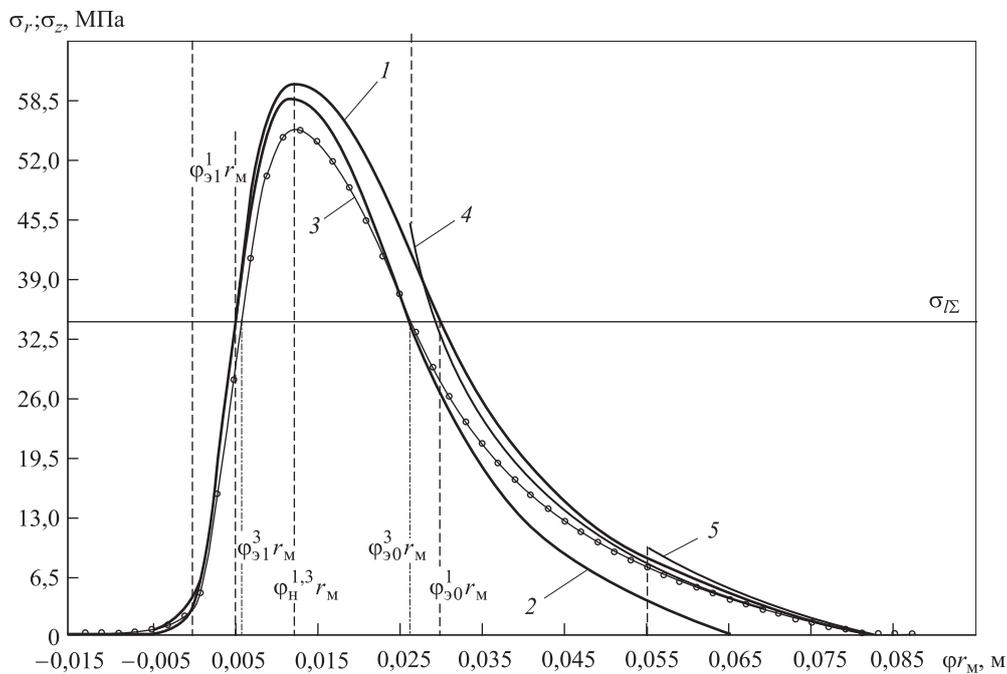


Рис. 6. Диаграммы изменения контактных радиальных и нормальных осевых напряжений в тангенциальном направлении в замкнутом клиновидном пространстве (экспериментальные данные):

- 1, 2 — усредненные по ширине эпюры радиальных напряжений (1 — $\bar{h}_0 = 0,01$ м; 2 — производительность 0,083 кг/с);
 3 — усредненная по ширине эпюра радиальных напряжений, но без ограничительных колец ($\bar{h}_0 = 0,01$ м, производительность 0,083 кг/с); 4 и 5 — нормальные осевые напряжения ($\bar{h}_0 = 0,01$ м) при $h_{шт} = 0,0015$ м и $h_{шт} = 0,005$ м соответственно

(мощность 7,8 кВт). При этом происходит более равномерный по ширине износ поверхностей матрицы и ролика (за счет выравнивания нормальных и влияющих на износ контактных касательных напряжений).

Нормальные осевые напряжения в замкнутом клиновидном пространстве ($\bar{h}_0 = 0,01$ м), измеренные вблизи контактной поверхности матрицы (см. рис. 6, кривая 4) и в середине высоты слоя (см. рис. 6, кривая 5), незначительно отличаются по величине от радиальных напряжений в тех же поперечных сечениях. Это подтверждает условия (1)–(4). Также на основании этого можно заявить о существенной величине сил сопротивления боковому выдавливанию, а значит, и активных сил бокового выдавливания. Здесь сила реакции со стороны колец, рассчитанная через эффективную площадь их контакта с комбикормом и измеренные осевые напряжения, составляет 3,11 кН. Это свидетельствует о том, что дополнительные контактные поверхности не просто ограничивают слой комбикорма, а удерживают прессуемую массу от интенсивного бокового выдавливания. Таким образом, пренебрегать влиянием бокового выдавливания на процесс гранулирования комбикормов, как это делают некоторые исследователи, некорректно.

Экспериментальные данные о контактных нормальных напряжениях в клиновидном пространстве хорошо согласуются с их теоретическими значениями в соответствии с формулами (4), (6), (7). В частности, этим подтверждается теоретически обоснованный характер распределения контактных касательных напряжений, учитываемый в выражениях (6) и (7).

На основании многочисленных экспериментов авторами установлено, что в результате торцевого ограничения клиновидного пространства повышается производительность гранулятора, снижается энергоемкость рабочего процесса в нем, улучшается качество готовых гранул и увеличивается долговечность рабочих органов.

Анализ напряженного состояния подтвердил, что это связано с предотвращением бокового выдавливания (ограничительная функция колец) и повышением захватывающей способности рабочих органов (функция дополнительных контактных поверхностей). Характер распределения контактных напряжений (при разных b/h_0) и эффект от ограничительных элементов подтверждены и в производственных условиях на грануляторах Б6-ДГВ и СРМ 7932-11.

Выводы

1. Разработаны конструкции силоизмерительных рабочих органов (прессующего ролика и ограничительного кольца) пресс-гранулятора с кольцевой матрицей, существенно расширяющие возможности экспериментальных исследований.

2. Экспериментально исследовано распределение контактных напряжений в тангенциальном и осевом направлениях в условиях незакрытого и закрытого клиновидного рабочего пространства гранулятора. Определены силы сопротивления боковому выдавливанию прессуемой массы. Это позволило установить адекватность и уточнить математическую модель напряженного состояния комбикорма в клиновидном пространстве, глубже раскрыть механизм процесса с учетом бокового выдавливания и возможности его предотвращения. В результате обоснована необходимость включения в конструкцию прессующего механизма дополнительных контактных поверхностей в виде ограничительных колец, обеспечивающих повышение эффективности процесса гранулирования.

3. Результаты тензометрических исследований могут быть использованы при проектировании новых и оптимизации существующих пресс-грануляторов с кольцевой матрицей с учетом оценки влияния факторов процесса непосредственно на его внутреннюю характеристику.

Литература

- [1] Глебов Л.А., Демский А.Б., Веденьев В.Ф., Темиров М.М., Огурцов Ю.М. *Технологическое оборудование предприятий отрасли (зерноперерабатывающие предприятия)*. Москва, ДеЛи принт, 2006. 816 с.
- [2] Pietsch W.B. *Agglomeration Processes. Phenomena, Technologies, Equipment*. Weinheim, Wiley-VCH, 2002. 614 p.
- [3] Salman A.D., Hounslow M.J., Seville J.P.K. (edit.). *Handbook of Powder Technology. Vol. 11. Granulation*. Oxford, Elsevier, 2007. 1402 p.
- [4] Payne J., Rattink W., Smith T., Winowiski T. *Pelleting Handbook*. Sarpsborg, Borregaard Lignotech, 2001. 73 p.

- [5] Ковриков И.Т., Кириленко А.С. Повышение производительности пресс-грануляторов путем ограничения рабочего пространства дополнительными контактными поверхностями. *Известия вузов. Пищевая технология*, 2011, № 5–6, с. 78–81.
- [6] Ковриков И.Т., Кириленко А.С. Математическое моделирование рабочего процесса в вальцово-матричном пресс-грануляторе с торцевым ограничением клиновидного пространства. *Научный журнал КубГАУ*, 2012, № 01(75), с. 132–155.
- [7] Ковриков И.Т., Кириленко А.С. Математическая модель напряженного состояния растительного материала в цилиндрических фильерах матрицы пресс-гранулятора. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2013, № 2(298), с. 25–34.
- [8] Ковриков И.Т., Кириленко А.С. *Пресс-гранулятор*. Пат. № 2412819, РФ. № 2009145789/02, заявл. 09.12.2009, опубл. 27.02.2011, бюл. № 6. 10 с.
- [9] Kai W., Yu S., Binbin P., Wuxue D., Shuanhu W. Modeling and Experiment on Rotary Extrusion Torque in Ring-die Pelleting Process. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, vol. 29, issue 24, pp. 33–39.
- [10] Никитин Г.С. *Теория непрерывной продольной прокатки*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 399 с.
- [11] Клименко П.Л., Данченко В.Н. *Контактные напряжения при прокатке*. Днепрпетровск, Пороги, 2007. 292 с.
- [12] Bindhumadhavan G., Seville J.P.K., Adams M.J., Greenwood R.W., Fitzpatrick S. Roll Compaction of a Pharmaceutical Excipient: Experimental Validation of Rolling Theory for Granular Solids. *Chemical Engineering Science*, 2005, vol. 60, iss. 14, pp. 3891–3897.
- [13] Schwanghart H. Messung und Berechnung von Druckverhältnissen und Durchsatz in einer Ringkoller-Strangpresse. *Aufbereitungs-Technik*, 1969, vol. 10, iss. 12, pp. 713–722.
- [14] Ковриков И.Т., Кириленко А.С. Исследование силовой характеристики замкнутого клиновидного рабочего пространства пресс-гранулятора с помощью тензометрического прессующего ролика. *Технические науки – от теории к практике*, 2014, № 35, с. 74–83.
- [15] Ковриков И.Т., Кириленко А.С. Исследование рабочего процесса пресс-гранулятора кормов с применением современных информационных технологий. *Инновационное развитие АПК России на базе интеллектуальных машинных технологий. Сб. науч. докл. Междунар. науч.-техн. конф.* Москва, Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства, 2014, с. 455–461.
- [16] Ковриков И.Т., Кириленко А.С. *Силоизмерительный прессующий ролик пресс-гранулятора*. Пат. № 2014147926, РФ, заявл. 27.11.2014. 20 с.
- [17] *The Pelleting Process*. URL: <http://www.cpm.net/downloads/Animal%20Feed%20Pelleting.pdf> (дата обращения 15 января 2015).

References

- [1] Glebov L.A., Demskii A.B., Veden'ev V.F., Temirov M.M., Ogurtsov Iu.M. *Tekhnologicheskoe oborudovanie predpriatii otrasli (zernopererabatyvaiushchie predpriatiia)* [Technological Equipment of Industry (Grain Processing Factories)]. Moscow, DeLi print publ., 2006. 816 p.
- [2] Pietsch W.B. *Agglomeration Processes. Phenomena, Technologies, Equipment*. Weinheim, Wiley-VCH, 2002. 614 p.
- [3] *Handbook of Powder Technology. Vol. 11. Granulation*. Ed. Salman A.D., Hounslow M.J., Seville J.P.K. Oxford, Elsevier, 2007. 1402 p.
- [4] Payne J., Rattink W., Smith T., Winowiski T. *Pelleting Handbook*. Sarpsborg, Borregaard Lignotech, 2001. 73 p.
- [5] Kovrikov I.T., Kirilenko A.S. Povyshenie proizvoditel'nosti press-granulatorov putem ogranicheniia rabocheho prostranstva dopolnitel'nymi kontaktnymi poverkhnostiami [Increased of Pellet Mills Capacity by Restriction of Working Space by Additional Contact Surfaces]. *Izvestiia vuzov. Pishchevaia tekhnologiia* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Food Technology]. 2011, iss. 5–6, pp. 78–81.
- [6] Kovrikov I.T., Kirilenko A.S. Matematicheskoe modelirovanie rabocheho protsessa v val'tsovo-matrichnom press-granulatore s tortsevim ogranicheniem klinovidnogo prostranstva [Mathematical Modeling of Working Process in Roller-Die Pellet Mill with Butt Restriction of Wedge-Shaped Space]. *Nauchnyi zhurnal KubGAU* [Scientific Journal of KubSAU]. 2012, iss. 01(75), pp. 132–155.

- [7] Kovrikov I.T., Kirilenko A.S. Matematicheskaya model' napriazhennogo sostoianiia rastitel'nogo materiala v tsilindricheskikh fil'erakh matritsy press-granuliatora [Mathematical Model of Stress System of Plant Raw Materials in Cylindrical Extrusion Nozzles of Pellet Mill Die]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology]. 2013, iss. 2(298), pp. 25–34.
- [8] Kovrikov I.T., Kirilenko A.S. *Press-granuliator* [Pellet mill]. Patent RF, no. 2412819, 2011.
- [9] Kai W., Yu S., Binbin P., Wuxue D., Shuanhu W. Modeling and Experiment on Rotary Extrusion Torque in Ring-die Pelleting Process. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, vol. 29, issue 24, pp. 33–39.
- [10] Nikitin G.S. *Teoriia nepreryvnoi prodol'noi prokatki* [Theory of Noninterruptible Lengthwise Rolling]. Moscow, Bauman Press, 2009. 399 p.
- [11] Klimenko P.L., Danchenko V.N. *Kontaktnye napriazheniia pri prokatke* [Contact Stresses at Rolling]. Dnepropetrovsk, Porogi publ., 2007. 292 p.
- [12] Bindhumadhavan G., Seville J.P.K., Adams M.J., Greenwood R.W., Fitzpatrick S. Roll Compaction of a Pharmaceutical Excipient: Experimental Validation of Rolling Theory for Granular Solids. *Chemical Engineering Science*, 2005, vol. 60, iss. 14, pp. 3891–3897.
- [13] Schwanghart H. Messung und Berechnung von Druckverhältnissen und Durchsatz in einer Ringkoller-Strangpresse. *Aufbereitungs-Technik*, 1969, vol. 10, iss. 12, pp. 713–722.
- [14] Kovrikov I.T., Kirilenko A.S. Issledovanie silovoi kharakteristiki zamknutogo klinovidnogo rabocheho prostranstva press-granuliatora s pomoshch'iu tenzometricheskogo pressuiushchego rolika [Research of Power Characteristics of Closed Wedge-Shaped Workspace of Pellet Mill by means of Tensometric Press Roller]. *Tekhnicheskie nauki — ot teorii k praktike* [Engineering Sciences – from Theory to Practice]. 2014, iss. 35, pp. 74–83.
- [15] Kovrikov I.T., Kirilenko A.S. Issledovanie rabocheho protsessa press-granuliatora kormov s primeneniem sovremennykh informatsionnykh tekhnologii. [Feed Pellet Mill Working Process Research with Using Modern Informational Technologies]. *Innovatsionnoe razvitie APK Rossii na baze intellektual'nykh mashinnykh tekhnologii. Sbornik nauchnykh dokladov Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Innovative Development of the Russian Agricultural Sector on the basis of Intelligent Machine Technology. Coll. of scientific rep. of the International Scientific and Technical Conference]. Moscow, All-Russian Research Institute of Agricultural Mechanization publ., 2014, pp. 455–461.
- [16] Kovrikov I.T., Kirilenko A.S. *Siloizmeritel'nyi pressuiushchii rolík press-granuliatora* [Force-Measuring Tensometric Press Roller of Pellet Mill]. Patent RF, no. 2014147926, 2014. (Unpublished).
- [17] *The Pelleting Process*. Available at: <http://www.cpm.net/downloads/Animal%20Feed%20Pelleting.pdf> (accessed 15 January 2015).

Статья поступила в редакцию 22.04.2015

Информация об авторах

КОВРИКОВ Иван Тимофеевич (Оренбург) — доктор технических наук, профессор, академик МААО и МАИ, профессор кафедры машин и аппаратов химических и пищевых производств, заслуженный деятель науки и техники РФ. ФГБОУ ВПО «Оренбургский государственный университет» (ОГУ, 460018, Оренбург, Российская Федерация, пр-т Победы, д. 13, e-mail: kovrikovit@mail.ru).

КИРИЛЕНКО Александр Сергеевич (Оренбург) — инженер лаборатории «Надежность» АНО «Технопарк ОГУ». ФГБОУ ВПО «Оренбургский государственный университет» (ОГУ, 460018, Оренбург, Российская Федерация, пр-т Победы, д. 13, e-mail: as@askirilenko.ru, integral138@mail.ru).

Information about the authors

KOVRIKOV Ivan Timofeevich (Orenburg) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Academician of IAAE and IIA, Professor, Department of Machinery and Equipment of Chemical and Food Industries, Honoured Scientist of the Russian Federation. Orenburg State University (OSU, 460018, Orenburg, Russian Federation, Pobedy ave., 13, e-mail: kovrikovit@mail.ru).

KIRILENKO Aleksandr Sergeevich (Orenburg) — Principal Engineer of Reliability Laboratory of OSU Industrial Park. Orenburg State University (OSU, 460018, Orenburg, Russian Federation, Pobedy ave., 13, e-mail: as@askirilenko.ru, integral138@mail.ru).