



Научная статья

УДК 663.482

DOI: 10.52957/2782-1900-2026-7-2-74-85

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ ОТХОДОВ ПИВОВАРЕНИЯ В РОТОРНОМ ГРАНУЛЯТОРЕ С ПЛОСКОЙ МАТРИЦЕЙ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ЦИКЛА УТИЛИЗАЦИИ

В.И. Назаров¹, Д.А. Макаренков^{1,2}, С.А. Родина², К.С. Костяева²,
А.Е. Кузнецов³, В.А. Василенко²

Вячеслав Иванович Назаров, канд. техн. наук, доцент, ведущий эксперт-наставник; **Дмитрий Анатольевич Макаренков**, д-р техн. наук, доцент, зам. руководителя по технологическим процессам и аппаратам, профессор кафедры информационных компьютерных технологий; **Софья Андреевна Родина**, студент, **Ксения Сергеевна Костяева**, студент, **Антон Евгеньевич Кузнецов**, студент; **Виолетта Анатольевна Василенко**, канд. техн. наук, доцент.

¹НИЦ Курчатовский институт, 123182, Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, nazarov_vi41@mail.ru, makarenkovd@gmail.com

²Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, 125047, Россия, Москва, Миусская площадь, д. 9, sofa.bear.a@gmail.com, vasilenko.v.an@muctr.ru

³Московский политехнический университет, 107023, Россия, Москва, ул. Б. Семёновская, д. 38, antonkuznetsov1413@mail.ru

Ключевые слова: пивная дробина, кизельгур, загрязнение окружающей среды, комбикорм, роторный гранулятор, метод прокатки, плоская матрица, эпюры распределения сил.

Аннотация. На пивоваренных заводах России ежегодно образуется большое количество пищевых отходов в виде кизельгура и пивной дробины, применяемых в составе комбикормов в гранулированном виде. Пивная дробина является ценным продуктом пивоварения с ограниченным сроком хранения (до 3х дней вследствие органического состава) и высокой влажностью (80–85%). После истечения срока хранения пивная дробина скисает с выделением аммиака и углекислого газа. В работе приведены результаты исследований по гранулированию пивной дробины и кизельгура методом прессования в роторном грануляторе с плоской матрицей и каналами переменного сечения. Представлена разработанная физическая и математическая модель процесса прокатки. Получены уравнения для определения сил, действующих в канале переменного сечения плоской матрицы. Для прессуемых смесей построены эпюры распределения сил по длине канала в плоской матрице, что позволило прогнозировать изменение давления в канале в зависимости от морфологии порошков. Приведена условная схема технологической линии производства питательной кормовой добавки с использованием модернизированной конструкции роторного гранулятора с плоской матрицей. Разработанная технология позволяет переводить сырую пивную дробину в гранулы, что способствует снижению экологического загрязнения окружающей среды.

Для цитирования:

Назаров В.И., Макаренков Д.А., Родина С.А., Костяева К.С., Кузнецов А.Е., Василенко В.А. Исследование процесса прессования отходов пивоварения в роторном грануляторе с плоской матрицей для технологического цикла утилизации // От химии к технологии шаг за шагом. 2026. Т. 7, вып. 2. С. 74-85. URL: <https://chemintech.ru/ru/nauka/issue/7273/view>



Введение

На предприятиях пивоваренной промышленности России ежегодно образуется большое количество сырых влажных отходов, таких как пивная дробина (ПД) и кизельгур. Существующие методы захоронения пивной дробины требуют тщательной подготовки и специального оборудования. Однако эти методы не гарантируют безопасность окружающей среды от биологических загрязнений. Переработка ПД приводит к значительным затратам как на транспортировку, так и на ее преобразование в товарный продукт [1].

ПД – это побочный продукт пивоварения, остатки ячменного (кукурузного, рисового или овсяного) сырья после выработки из него сусла. Чаще всего она представляет собой суспензию из частиц семян и оболочек зерна, богатую растительной клетчаткой. Обычно ее используют в качестве кормовой добавки к комбикормам в рационах питания скота и птицы [2, 3]. ПД содержит достаточно большую долю перевариваемого протеина (4% в свежей и 17% в высушенной), превышающую почти в 3 раза его содержание в ячмене, а также важнейшие микроэлементы (фосфор, кальций, магний, медь, железо), жирные кислоты и витамины Е и F. Результаты экспериментов показывают, что при скармливании ее бычкам на откорм, их прирост в весе увеличивался на 14%. Употребление рекомендуемых доз не приводит к каким-либо отклонениям в здоровье животных [4]. ПД позволяет экономить на потребляемых комбикормах, т.к. включение в рацион скота дробины снижает себестоимость корма, а привес поголовья увеличивается на 9%. В жидком виде она долго не хранится и быстро прокисает за 48 – 72 часа. Срок хранения сухой дробины в виде порошка увеличивается до 2 мес., а сухой гранулированной – до 18 мес. [5]. Для перевода ПД в порошки или гранулы часто используют сушку с помощью распылительных сушилок или сушилок в кипящем слое. Эти процессы энергоемкие, имеют высокую стоимость и требуют больших площадей для размещения оборудования. Известна также технология получения гранулированных комбикормов на валковых прессах или роторных грануляторах с кольцевой или плоской матрицей.

Во всем мире образуется огромное количество отработанного кизельгура, содержащего в своем составе органические вещества, осевшие на частицах в процессе фильтрации пива. Кизельгур можно использовать в промышленности в качестве адсорбента или добавки при производстве цемента, обычных и силикатных кирпичей, а также в сельском хозяйстве в качестве удобрения или добавки к комбикормам. Часто используют кизельгур для улучшения структуры почвы [6]. Это приводит к ее разрыхлению, увеличению объема пор. В результате повышается количество удерживаемой влаги, питательных веществ. При обработке кизельгуром растений облегчается попадание в них метакремниевой кислоты (H_2SiO_3), которая является источником доступного кремния, укрепляющего клеточные стенки, и повышает иммунитет растений. Кизельгур используется в комбикормах для свиней как натуральная минеральная добавка, богатая кремнием, кальцием и микроэлементами. При этом улучшается пищеварение и усвояемость питательных веществ за счет роста количества бифидо- и лактобактерий, что повышает продуктивность и сохранность поголовья. Отработанный кизельгур, впитав в себя белок, сахара, прочие вещества и микроорганизмы из пива, как и дробина, не может долго храниться [7]. Таким образом,



для дальнейшего использования в комбикормах, кизельгур необходимо сушить, гранулировать и дезинфицировать.

Основная часть

Проанализируем основные свойства и характеристики ПД. В табл. 1 и 2 представлен химический состав образующейся ПД и высушенной ПД, соответственно [8].

Таблица 1. Химический состав образующейся пивной дробины (в 1 кг)

Показатель	Жидкая	Сухая
Сухое вещество, г	232	887
Сырой протеин, г	58	217
Сырая клетчатка, г	39	140
Безазотистые экстрактивные вещества (БЭВ), г	107	406
Сырой жир, г	17	60
Витамин Е (токоферол), мг	14	23
Витамин В 1 (тиамин), мг	0,2	0,6
Витамин В 2 (рибофлавин), мг	0,3	0,9
Витамин В 4 (холин), мг	510	1300
Никотиновая кислота (витамин РР, ниацин, витамин В3), мг	13	36

Из таблиц видно, что в ПД содержатся нерастворимые вещества с витаминами, белки, осажденные в результате кипячения затора, и продукты взаимодействия белка с дубильными веществами. В жидкой фракции ПД имеются липидные вещества, представленные в основном триглицеридами, свободными жирными кислотами и фосфолипидами. Большая часть витаминов, содержащихся в ячменном солоде, переходит в дробину: витамины Е, В1, В2, В4, никотиновая кислота.

Таблица 2. Состав сухой пивной дробины (в %)

Показатель	%	Показатель	%
Общий химический состав		Микроэлементы	
Влага	8,67	Кальций	0,37
Сырой протеин	23,44	Фосфор	0,5
Сырой жир	7,75	Марганец, мг/кг	52
Сырая зола	2,5	Цинк, мг/кг	105
Сырая клетчатка	14,3	Железо, мг/кг	205
Безазотистые экстрактивные вещества (БЭВ)	43,44	Медь, мг/кг	15
Аминокислоты			
Лизин	0,86	Пролин	2,05
Гистидин	0,66	Глицин	0,79
Аргинин	1,07	Аланин	0,94
Аспарагиновая кислота	1,35	Цистин	0,46
Треонин	0,77	Валин	1,06
Серин	0,89	Метионин	0,5
Глутаминовая кислота	4,56	Лейцин	0,57
Изолейцин	0,79	Фенилаланин	1,23
Тирозин	0,61	Всего аминокислот	19,17
		В том числе незаменимых аминокислот	7,51



Частицы кизельгура – это пористые кремнистые (диатомовые) частицы размером от 0,001 до 0,01 мм. Органическая составляющая отработанного кизельгура представлена клетками пивных дрожжей, белками и другими органическими веществами, отфильтрованными от пива.

Отработанный кизельгур содержит около 70–80% воды и около 20–30% сухого остатка. Химический состав сухого остатка отработанного кизельгура (% масс.): SiO_2 – (80,0–99,0); Al_2O_3 – (0,1–6,0); Fe_2O_3 <3,0; CaO – (0,5–2,0); Na_2O – (0,5–3,0); K_2O – (0,5–3,0); P_2O_5 – (0,1–0,2); TiO_2 – (0,5–3,0); MgO – (0,5–3,0); сырой белок – 11,7; азот – 1,5; глюкоза – 0,43. Плотность влажного отработанного кизельгура изменяется в соответствии с содержанием в нем воды. Например, плотность отработанного кизельгура влажностью 71% составляет 1160 кг/м³ [7].

Наиболее используемым гранулирующим оборудованием таких отходов является роторный гранулятор с кольцевой матрицей, применяемый при производстве комбикормов. Однако такой гранулятор имеет сложную конструкцию, а наличие образующейся просыпи при гранулировании усложняет контроль за его работой [9]. Более перспективным является использование гранулятора с плоской матрицей [10]. Для разработки процесса гранулирования ПД и кизельгура в роторном грануляторе с плоской матрицей и определения режимных параметров проведены исследования процесса прессования в закрытой матрице с получением прессовок.

В работе приводятся результаты компрессионных испытаний в закрытой матрице с различными связующими и добавками (табл. 3). В качестве связующих использовали отходы целлюлозно-бумажной промышленности (лигносульфанат), водный раствор сахара.

Таблица 3. Состав смесей при прессовании в закрытой матрице

Компонент смеси, масс. %	Номер смеси				
	1	2	3	4	5
Сухая дробина	100	75	75	75	70
Кизельгур	—	25	—	—	20
Сахар	—	—	25	12,5	10
25% раствор ЛСТ	—	—	—	12,5	—
Влажность	8	9	6	11	6

В технологической схеме получения гранулированной кормовой добавки вместо сахара можно использовать свекольную патоку (мелассу), что позволит утилизировать отходы производства свеколичного сахара и уменьшить стоимость конечного продукта.

В результате проведенных компрессионных испытаний получены зависимости изменения плотности гранул и прочности на раскалывание от удельного давления прессования и влажности. Из рис. 1 видно, что плотность полученных прессовок изменялась в диапазоне от 800 до 1200 кг/м³. Установлено, что плотно-прочные прессовки начинают образовываться при удельном давлении в диапазоне от 40 до 100 МПа. Дальнейшее увеличение удельного давления прессования практически не приводит к росту плотности гранул. Прочность прессовок колебалась в диапазоне от 0,1 до 1,5 МПа (рис. 2).

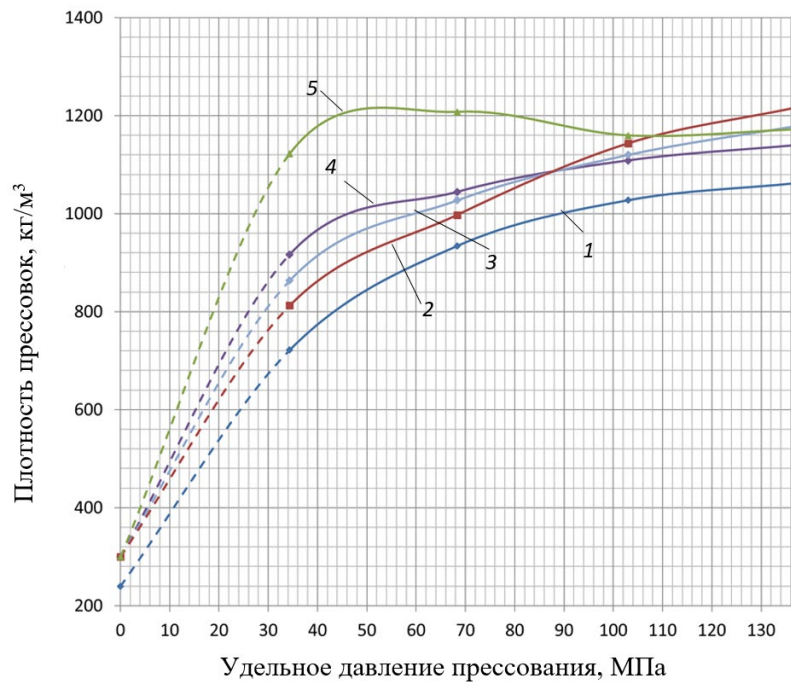


Рис. 1. Зависимость плотности прессовок от удельного давления прессования (номера кривых соответствуют номерам смесей, приведенных в табл. 3)

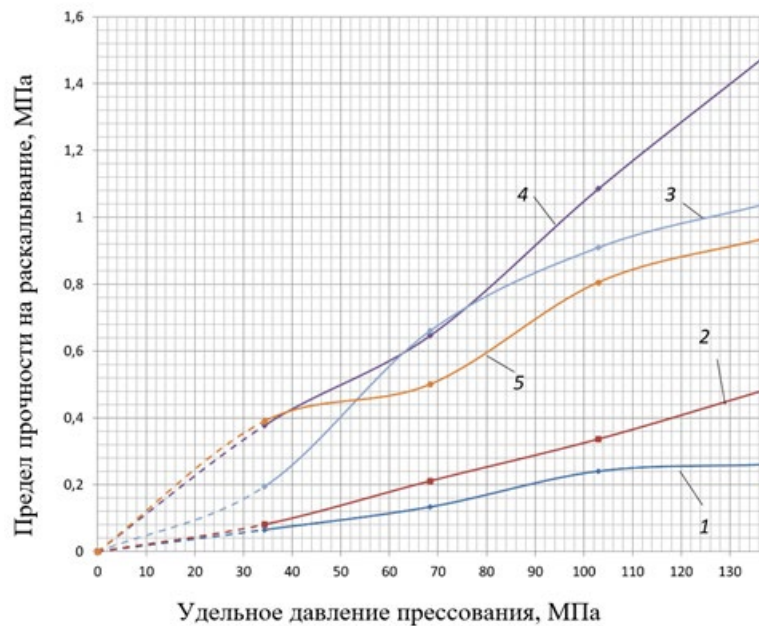


Рис. 2. Зависимость предела прочности на раскалывание прессовок от удельного давления прессования (номера кривых соответствуют номерам смесей, приведенных данным табл. 3)

Установлено, что оптимальным является значение плотности $\rho_{\text{пр}} = 1000 \text{ кг/м}^3$, которое соответствует изменению предела прочности на раскалывание в диапазоне 0,2–0,8 МПа, достигаемом при удельном давлении 80 МПа. Полученный гранулированный продукт обладает биологической устойчивостью, не загнивает при хранении, а его прочностные характеристики обеспечивают транспортировку, перегрузочные операции и хранение без разрушения.



Выявлено, что прессовка из смеси 4 (см. рис.2) при прессовании имела максимальную прочность при изменении конечной влажности в пределах 9–11% после сушки. Таким образом, композиция связующего из лигносульфата и раствора сахара (или мелассы) обеспечивает высокие прочностные характеристики прессовок.

Ранее авторами разработана комбинированная матрица, состоящая из двух дисков, с нагревательными гибкими элементами, которые позволяют регулировать температуру смеси в каналах проходного прессования [11]. Каналы в матрицах могут выполняться как цилиндрическими, так и цилиндрическими. Такое конструктивное оформление делает данную конструкцию технологичной в изготовлении.

Гранулятор работает следующим образом. При движении вращающихся роликов над поверхностью матрицы происходит послойная и порционная запрессовка сырья в каналы. В результате на выходе из каналов образуются цилиндрические гранулы в виде твердого пористого тела.

Рассмотрим движение материала в цилиндрическом канале и условия равновесия сил в цилиндрическом канале длиной $h_{вх}$ (см. рис. 3).

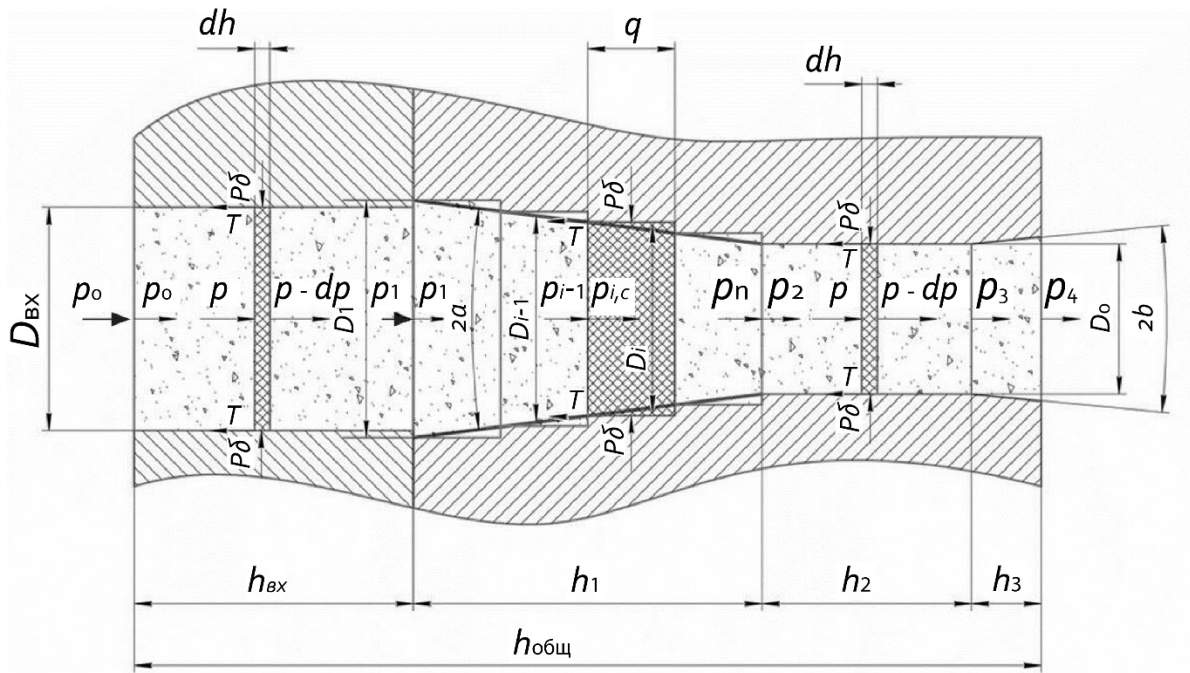


Рис. 3. Схема сил, действующих на материал в канале проходного прессования

Принимая за положительное направление действия сил прессования для элемента длиной dh на различных участках, получим следующие уравнения для расчета удельных давлений в цилиндрическом канале:

$$p \frac{\pi D_{вх}^2}{4} - T = (p - dp) \frac{\pi D_{вх}^2}{4}, \quad (1)$$

$$p_1 = p_0 \exp\left(-\frac{4}{D_{вх}} f \xi h_{вх}\right), \quad (2)$$

$$p_3 = p_2 \exp\left(-\frac{4}{D_0} f \xi h_3\right), \quad (3)$$



где p, p_0, p_1, p_2, p_3 – давления на слой исходной смеси, на входе и выходе с каждого участка соответственно; ξ – коэффициент бокового давления; f – коэффициент внешнего трения; T – сила трения; остальные обозначения соответствуют рис. 3.

Удельное давление на выходе из конической части участка определяется согласно выражению

$$p_2 = p_n \frac{D_n^2}{D_0^2}, \quad (4)$$

где p_n – давление на выходе последнего (n -го) элемента; D_n – диаметр последнего участка.

При расчете эпюры изменения давления по длине канала приняты следующие значения для геометрических размеров канала: $D_{\text{вх}} = 8$ мм; $D_0 = 6$ мм; $h_{\text{вх}} = 19$ мм; $h_1 = 19,5$ мм; $h_2 = 7,5$ мм; $h_3 = 4$ мм; для коэффициента внешнего трения – $f = 0,1$. Данные значения определяются технологией изготовления матрицы. В качестве исследуемого материала для получения пеллет выбрана смесь 4 (см. табл.3).

На выходе материала из цилиндрикоконического канала (длиной h_3) прессовка под действием упругих деформаций расширяется, увеличивает свои размеры, а давление p_4 падает до нуля. При решении системы уравнений изменения давления (1)-(4) по длине канала использован язык программирования Python [12], среда разработки IDE PyCharm [13]. В качестве исходных данных введены параметры гранулятора, геометрические размеры канала, характеристики среды и режимные параметры процесса прессования. Меню ввода данных приведено на рис. 4.

Модель давления гранулятора

Параметры гранулятора

Геометрия канала

Dвх (мм): 16.0
Dвых (мм): 14.0
hвх (мм): 19.0
h₁ (мм): 19.5
h₂ (мм): 7.5
h₃ (мм): 4.0

Физические параметры

Коеф. трения f: 0.25
Плотность (кг/м³): 1200

Кoeffициенты бокового давления

ξ при P_c=40 МПа: 0.63
ξ при P_c=70 МПа: 0.72

Построить все графики Сброс к значениям по умолчанию Выход

Текущие параметры

Геометрия канала:
Dвх = 16.0 мм, Dвых = 14.0 мм
hвх = 19.0 мм, h₁ = 19.5 мм
h₂ = 7.5 мм, h₃ = 4.0 мм
Общая длина: 50.0 мм

Физические параметры:
f = 0.25, ρ = 1200.0 кг/м³

Рис. 4. Меню ввода данных в среде разработки IDE PyCharm



Используя полученные уравнения (2), (3), (4) с соответствующими значениями коэффициента бокового давления ξ для определения давления по длине каналов (p_0, p_1, p_2, p_3), а также программное обеспечение, построены эпюры распределения давлений по длине канала. При этом учитывалось влияние угла конусности и исходное давление прессования. Из приведенных на рис. 5 эпюр следует, что в цилиндрической части канала давление от входа к выходу падает, а в конической части – растет за счет увеличения значения коэффициента бокового давления. На участках h_2 и h_3 давление падает за счет выхода материала в свободное пространство. Установлено, что при увеличении угла конусности больше 3° на длине h_1 давление растет и могут образовываться пробки в канале, что приведет к остановке технологического процесса.

Предложенная методика расчета силовых параметров в каналах плоской матрицы позволяет рассчитать процесс гранулирования пивоваренных отходов с различной морфологией.

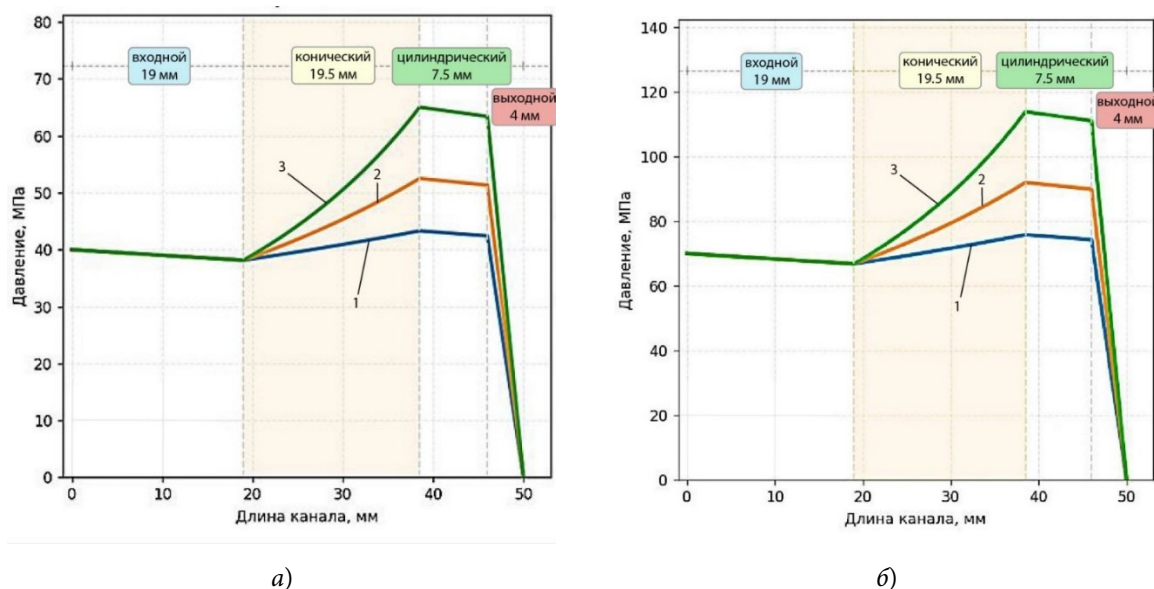


Рис. 5. Эпюры распределения давления в цилиндроконическом канале плоской матрицы в зависимости от угла конусности 2α и исходного удельного давления прессования для смеси 4 при $\xi = 0,1$: (а – $p = 40$ МПа; б – $p = 70$ МПа): 1 – $\alpha = 1^\circ$; 2 – $\alpha = 2^\circ$; 3 – $\alpha = 3^\circ$

На основании проведенных исследований модернизирована технологическая линия производства питательной кормовой добавки, которая может быть применена в животноводстве. За основу принята технология гранулирования ПД, осуществляемая на ОАО «ПК Балтика». Недостатком существующей схемы является использование нории (элеватора) для перемещения исходных компонентов из контактной сушилки в шнековый смеситель. При этом происходит образование просыпи и, соответственно, потеря продукта. Данный этап сопровождается попаданием пыли в цех предприятия, что негативно влияет на здоровье обслуживающего персонала. Кроме того, как показано выше, использование роторного гранулятора с кольцевой матрицей приводит к пылению и образованию мелкой нетоварной фракции. В предлагаемой схеме вместо нории устанавливается закрытый ленточный транспортер, снабженный местным отсосом для уменьшения запыленности цеха и используется роторный гранулятор с плоской матрицей.



Условная схема процесса утилизации ПД с кизельгуром с использованием роторного гранулятора с плоской матрицей представлена на рис. 6. Жидкая ПД подается в накопительный бункер с мешалкой-гомогенизатором, из которого затем перетекает в декантер. После разделения суспензии, отделившаяся свободная влага подается в центрифугу, а отжатая дробина транспортером перемещается в сушилку. В выходящем из декантера фильтрате много взвесей и органических веществ (белки, клетчатка, безазотистые вещества), поэтому образующаяся суспензия пропускается через центрифугу. Осветленная отфильтрованная жидкость сливается в канализацию.

На входе в сушилку смешиваются кизельгур, отжатая ПД и остаток с центрифуги. Сушка осуществляется контактным методом. Высушенная смесь поступает в смеситель, в котором к шихте добавляются связующие: меласса и лигносульфанат технический (возможно использование аналогичных заменителей). Смесь транспортируется в роторный гранулятор с плоской матрицей, разработанный в НИЦ «Курчатовский институт» [14]. В нем вращающиеся ролики проталкивают шихту через матрицу. Смесь, проходя через каналы в матрице, прессуется и выходит в виде гранул (пеллет). Эти гранулы ленточным транспортером поднимаются в охладитель, в котором обдуваются воздухом. Для отделения товарной фракции продукт направляют на классификацию. Гранулы, размеры которых не соответствуют заявленным требованиям, возвращаются обратно в шнековый смеситель, а товарная продукция – на упаковку.

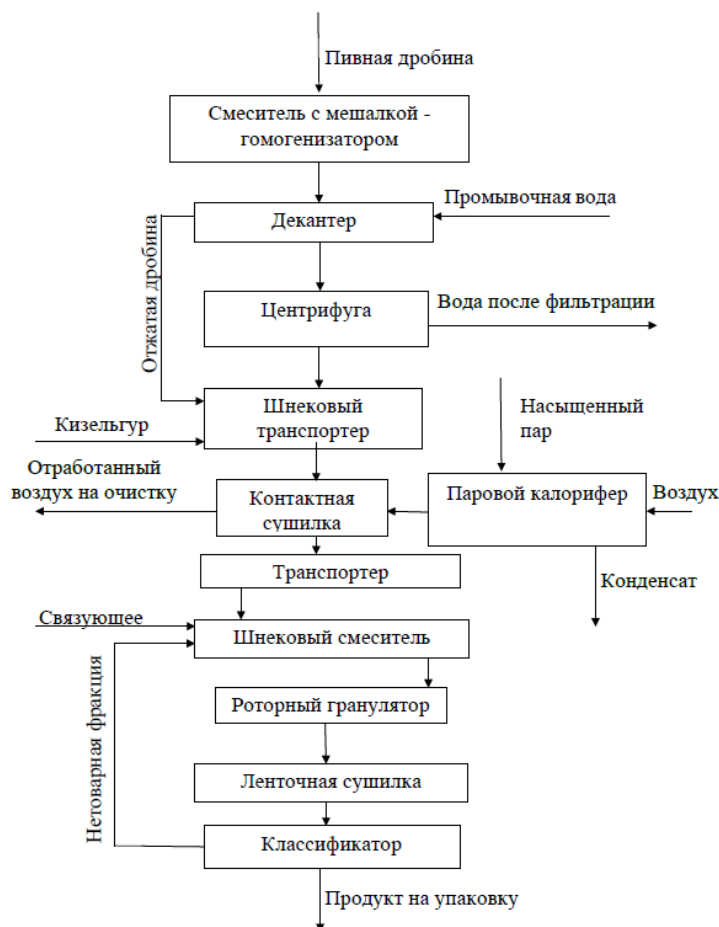


Рис. 6. Условная схема процесса утилизации ПД с кизельгуром с использованием роторного гранулятора с плоской матрицей



Особенностью конструкции разработанного роторного гранулятора с плоской матрицей является использование цилиндрических каналов, которые обеспечивают процесс образования цилиндрических гранул (пеллет). На рис. 7 представлен общий вид разработанного гранулятора, в состав которого входят внешний корпус, патрубки для загрузки порошка, плоская матрица и прессующие ролики.

Подготовленный материал (смесь ПД, кизельгура и добавок) подается через загрузочные патрубки в корпус аппарата. Вращающиеся ролики создают контактное напряжение смятия сырья на матрице, продавливают его через отверстия с получением на выходе из матрицы пеллет. Материал, поступающий на матрицу, распределяется по всей ее поверхности вращающимися роликами. Шихта, попадая под прессующие ролики, запрессовывается в каналы матрицы. В каналах происходит уплотнение материала и его постепенное продавливание по длине канала.

В данной конструкции роторного гранулятора с плоской матрицей реализуются принципы проходного прессования. Этот вид прессования сыпучего материала является односторонним, т.к. перемещение пуансона совершается только относительно матрицы. Прессовки выходят снизу матрицы. Уплотнение материала происходит из-за сужения канала матрицы.

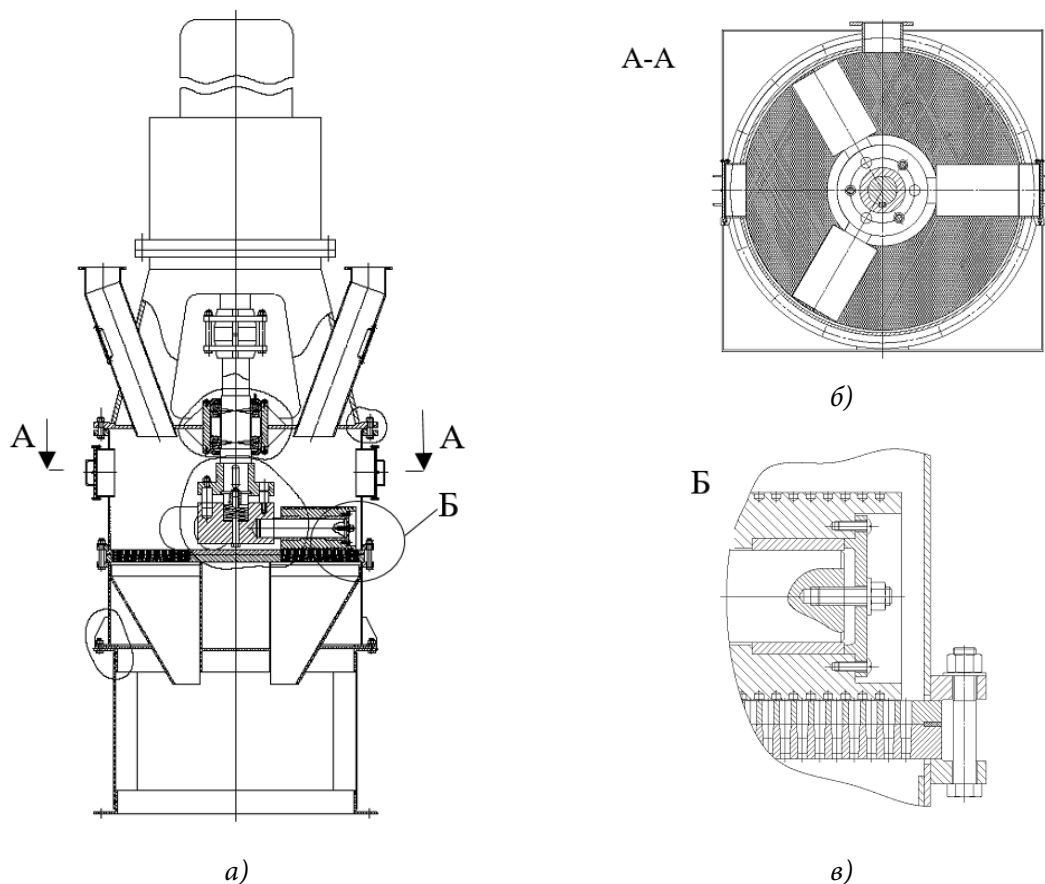


Рис. 7. Схема роторного гранулятора с плоской матрицей: а) общий вид гранулятора; б) узел размещения прокатывающих роликов над матрицей; в) конструкция крепления плоской матрицы в корпусе

Длина получаемой гранулы определяется длиной выходной части формирующего канала. Полученные гранулы выходят с внешней стороны матрицы, сыплются по наклонному лотку в бункер ленточного транспортера, подающего их на упаковку.



Выводы

Предложено описание механизма гранулирования ПД с кизельгуром в цилиндрикоконическом канале плоской матрицы при воздействии на материал прессующего вала.

Для плоской матрицы построены эпюры распределения давления в канале переменного сечения.

Установлено, что прессовка из смеси 4 (см. табл.3) имеет максимальную прочность при изменении конечной влажности в пределах 9–11% после сушки. Таким образом, композиция связующего из лигносульфаната и раствора сахара (или мелассы) обеспечивает высокие прочностные характеристики прессовок.

Выявлено, что оптимальным является значение плотности $\rho_{пр} = 1000 \text{ кг/м}^3$, которое соответствует изменению предела прочности на раскалывание в диапазоне 0,2–0,8 МПа, достигаемом при удельном давлении 80 МПа и влажности 7–10%.

На основе результатов экспериментальных исследований разработана конструкция роторного гранулятора с плоской матрицей с цилиндрикоконическими каналами.

Предложена экологически безопасная схема переработки сырой ПД и кизельгура с использованием гранулятора с плоской матрицей и новыми типами транспортирующих устройств. Разработанная схема утилизации отходов пивоварения позволяет снизить экологическую нагрузку на окружающую среду.

Финансирование

Работа выполнена с использованием научного оборудования ЦКП «Исследовательский химико-аналитический центр НИЦ «Курчатовский институт».

Список источников

1. Батищева Н.В. Инновационные способы утилизации пивной дробины. Научное обозрение. *Технические науки*, 2016, (6), 10–14. URL: <https://science-engineering.ru/ru/article/view?id=1121> (дата обращения: 10.03.2026).
2. Чохатариди Г.Н., Кабулов В.Ю., Доева И.Г. Качество мяса свиней при использовании пивной дробины в их рационах. *Все о мясе*, 2007, (2), 38–39.
3. Mukasafari M.A., Ambula M.K., Karege C., King'ori A.M. Effects of substituting sow and weaner meal with brewers' spent grains on the performance of growing pigs in Rwanda. *Trop. Anim. Health Prod.*, 2018, 50, 393–398.
4. Aliyu S., Bala M. Brewer's spent grain: A review of its potentials and applications. *Afr. J. Biotechnol.*, 2011, 10, 324–331.
5. Кузнецов В.М. Кормовые средства в рационах крупного рогатого скота Сахалинской области: монография. Сахалинский научно-исследовательский институт сельского хозяйства. Чебоксары: Среда, 2022, 300 с.
6. Молоканова Л.В., Овчаренко С.Р., Пугачева И.Н. Отработанный кизельгур – перспективный почвоулучшитель. Фундаментальные и прикладные исследования в области химии и экологии – 2022. Сборник научных статей Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 80-летию со дня рождения профессора Ф.Ф. Ниязи, 2022, С. 127–130. DOI: 10.47581/2022/Xt-01/Molokanova-Ovcharenko.01.



7. Руденко Е.Ю., Падерова К.М., Антропова Е.Д., Зипаев Д.В. Возможности использования отработанного кизельгура. *Пищевая промышленность*, 2011, (1), 62-64.
8. Назаров В.И., Бичев М.А. Разработка процессов утилизации отходов пивоварения с получением гранулированного продукта. *Пиво и напитки*, 2011, (3), 32-35.
9. Брагинец С.В., Бахчевников О.Н., Деев К.А. Влияние различных параметров на процесс гранулирования растительного сырья и качество гранул (обзор). *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*, 2023, 24(1), 30-45. DOI: 10.30766/2072-9081.2023.24.1.30-45.
10. Arranz J.I., Sepúlveda F.J., Montero I., Romero P., Miranda M.T. Feasibility Analysis of Brewers' Spent Grain for Energy Use: Waste and Experimental Pellets. *Appl. Sci.*, 2021, 11(6), 2740. DOI: 10.3390/app11062740.
11. Назаров В.И., Макаренко Д.А., Булатов И.А. Исследование процесса гранулирования дисперсных отходов на роторных прессах с плоской матрицей. *Вестник МИТХТ*, 2010, 5(6), 13-16.
12. Python: [сайт]. URL: <https://www.python.org/> (дата обращения: 05.02.2026).
13. JetBrains: [сайт]. URL: <https://www.jetbrains.com/> (дата обращения: 05.02.2026).
14. Макаренко Д.А., Назаров В.И. Техника и технология гранулирования многокомпонентных полидисперсных материалов с использованием совмещенных процессов их подготовки: монография. М.: ИНФРА-М, 2023, 297 с.

Поступила в редакцию 01.04.2026

Одобрена после рецензирования 18.05.2026

Принята к опубликованию 01.06.2026