Оригинальная статья

УДК 662.813/.814 © А.С. Кондратенко✉[1], В.А. Калашников[2], Н.В. Жерлова[2], 2026

[1] ФГБОУ ВО «Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова», 670000, г. Улан-Удэ, Россия
[2] ООО «Тугнуйская обогатительная фабрика», 671353, пос. Саган-Нур, Республика Бурятия, Россия
✉ e-mail: cubanit@yandex.ru

Original Paper

UDC 662.813/.814 © A.S. Kondratenko✉[1], V.A. Kalashnikov[2], N.V. Zherlova[2], 2026

[1] Banzarov Buryat State University, Ulan-Ude, 670000, Russian Federation
[2] Tugnui Processing Plant", Village Sagan-Nur, 671353, Republic of Buryatia, Russian Federation
✉ e-mail: cubanit@yandex.ru

Инженерно-физическое моделирование процессов брикетирования хвостов углеобогащения с лигнинсодержащим связующим на вальцовом прессовом оборудовании*

Engineering and physical modeling of the briquetting processes for coal washing tailings using a lignin-containing binder on roller press equipment

DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2026-10-53-60

В статье представлено инженерно-физическое (расчетное) моделирование процессов прессования сырья, состоящего из хвостов углеобогащения Тугнуйской ОФ (кек) и лигнинсодержащего связующего (отходов целлюлозно-картонного производства Селенгинской ЦКК) на вальцовом потоковом прессе. В основу модели положены как паспортные характеристики оборудования (такие как мощность и частота вращения привода, передаточное число, производительность и т.д.), так и принципы геометрического подобия (размерность, форм-факторность оборудования и получаемой продукции (брикетов)) и процесса (дискретно-линейчатая последовательность) прессования. Лабораторно-аналитическими методами определены важнейшие характеристики перерабатываемого сырья, такие как: фракционный состав и усредненные (по количеству выделенных фракций) действительная (истинная), кажущаяся и насыпная плотности, также определены средняя масса и пористость брикетов. Вычислительным путем установлены объем и форм-фактор (расчетный коэффициент) создаваемого брикета, представляющего собой сложную скругленно-обтекаемую подушкообразную форму, с вычислением его поперечного сечения (площади образующей), а также площади поверхности (см^2) и удельной площади (см$^{-1}$) поверхности. Найденное расчетным путем давление прессования обеспечивает хорошую компрессию сырья, а обтекаемая форма снижает концентрацию напряжений по углам, повышая устойчивость брикетов к ударам и истиранию, что благоприятствует транспортировке и хранению, а также использованию в

КОНДРАТЕНКО А.С.
Канд. техн. наук,
старший научный сотрудник
ФГБОУ ВО «Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова»,
670000, г. Улан-Удэ, Россия,
e-mail: cubanit@yandex.ru

КАЛАШНИКОВ В.А.
Директор ООО «Тугнуйская обогатительная фабрика»,
671353, пос. Саган-Нур,
Республика Бурятия, Россия,
e-mail: KalashnikovVAn@suek.ru

ЖЕРЛОВА Н.В.
Главный технолог ООО «Тугнуйская обогатительная фабрика»,
671353, пос. Саган-Нур,
Республика Бурятия, Россия,
e-mail: GherlovaNV@suek.ru

** Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 26-27-20030 «Научное обоснование и разработка экологически чистых технологий переработки техногенных минеральных отходов»).*

бытовых и промышленных топках, делая их пригодными для коммерческого использования в качестве твердого топлива.

Ключевые слова: *хвосты углеобогащения, связующее, валковый пресс, плотность, пористость, расчетное моделирование, коэффициент формы, объем, поверхность, процесс брикетирования, производительность, давление прессования.*

Для цитирования: Кондратенко А.С., Калашников В.А., Жерлова Н.В. Инженерно-физическое моделирование процессов брикетирования хвостов углеобогащения с лигнинсодержащим связующим на вальцовом прессовом оборудовании // Уголь. 2026;(10):53-60. DOI: 10.18796/0041-5790-2026-10-53-60.

Abstract

The article presents engineering and physical (computational) modeling of the processes of pressing raw materials consisting of tailings from the coal enrichment of the Tugnui Processing Plant (keck) and a lignin-containing binder (waste from the pulp and cardboard production of the Selenginsky Pulp and cardboard combine) on a roller flow press. The model is based on both the passport characteristics of the equipment (such as drive power and speed, gear ratio, productivity, etc.), as well as the principles of geometric similarity (dimension, form factor of equipment and products (briquettes)), and the process (discrete linear sequence) of pressing. Laboratory and analytical methods have determined the most important characteristics of the processed raw materials, such as: fractional composition and average (by the number of isolated fractions) actual (true), apparent and bulk densities, as well as the average mass and porosity of briquettes. The volume and form factor (calculation coefficient) of the created briquette, which is a complex rounded-streamlined cushion-shaped shape, have been computationally determined, with the calculation of its cross-section (forming area), as well as surface area (cm^2) and specific surface area (cm^{-1}). The calculated pressing pressure ensures good compression of raw materials, and the streamlined shape reduces stress concentration at the corners, increasing the resistance of briquettes to impact and abrasion, which favors transportation and storage, as well as use in domestic and industrial furnaces, making them suitable for commercial use as solid fuels.

Keywords

Tailings of coal enrichment, binder, roller press, density, porosity, computational modeling, shape coefficient, volume, surface, briquetting process, productivity, pressing pressure.

Acknowledgements

The work was supported by the Russian Science Foundation (RSF), project No: 26-27-20030 "Scientific substantiation and development of environmentally friendly technologies for processing man-made mineral waste".

For citation

Kondratenko A.S., Kalashnikov V.A., Zherlova N.V. Engineering and physical modeling of the briquetting processes for coal washing tailings using a lignin-containing binder on roller press equipment. *Ugol'*. 2026;(10):53-60. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2026-10-53-60.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях растущего внимания к вопросам рационального использования природных ресурсов и утилизации промышленных отходов особую актуальность приобретает переработка хвостов углеобогащения (кек) в коммерческое твердое топливо [1]. Одним из наиболее перспективных направлений в этой области является брикетирование этих кеков с применением различных типов связующих веществ, например лигнинсодержащих связующих – отходов целлюлозно-картонного производства [2].

Целью данной исследовательской работы являлись разработка инженерно-физической модели, установление и расчет с ее помощью процессов брикетирования хвостов углеобогащения Тугнуйской обогатительной фабрики (кек) с лигнинсодержащим связующим (отходы Селенгинского целлюлозно-картонного комбината) на вальцовом потоковом прессе [3, 4, 5]. В качестве первичных данных для создания и расчета модели, ее основных условий и допущений использовались лабораторно-аналитические исследования ключевых характеристик сырья (фракционный состав и плотности, а также средняя масса брикетов) позволившие определить пористость, объем, площадь поперечного сечения, суммарную и удельную площади поверхности единичного (представительного) брикета, имеющего сложную скругленно-подушковидную форму [6, 7, 8]. Затем, используя данные паспортных характеристик (таких как мощность и частота вращения привода, передаточное число, производительность и т.д.), а также критерии геометрического подобия, удалось провести расчеты производительности оборудования и количества выпускаемых брикетов с установлением КПД вальцового пресса. Далее расчетно-вычислительным способом удалось определить общее передаточное отношение, крутящий момент на валу двигателя и на синхронно движущихся навстречу друг к другу вальцах, а также усилие прессования [9]. На заключительном этапе моделирования были найдены (и проверены) как общее давление прессования, так и давление прессования единичного брикета, а также время его выпуска [10].

Найденное расчетным путем давление прессования обеспечивает хорошую компрессию сырья, а обтекаемая форма снижает концентрацию напряжений по углам, повышая устойчивость брикетов к ударам и истиранию, что благоприятствует транспортировке и хранению, а также использованию в бытовых и промышленных топках, делая их пригодными для коммерческого использования в качестве твердого топлива [11].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве сырьевых материалов использовались хвосты углеобогащения Тугнуйской ОФ, а также лигнинсодержащие отходы Селенгинского ЦКК, подробно изученные в работе [12]. Также в исследовании применялось прессовое оборудование в виде компактного высокопроизводительного вальцового пресса для производства топливных брикетов (*см. рисунок*).

Вальцовый пресс для брикетирования угольной мелочи/отходов и образец получаемой продукции
A roller press for briquetting fine coal and coal waste, and a sample of the obtained product

РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОРИСТОСТИ И ОБЪЕМА ТОПЛИВНОГО БРИКЕТА СЛОЖНОЙ ФОРМЫ, А ТАКЖЕ ПЛОЩАДЕЙ ЕГО ОБРАЗУЮЩЕЙ, ОБЩЕЙ И УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ

I. Вводные понятия, основные условия и допущения

Действительная (истинная) плотность брикета $\rho_{ист.бр.}$ – плотность его материала без учета пор, показывает массу твердого тела в единице объема. В случае с сырьем (кек + связующее) $\rho_{ист.бр.}$ = 1550 кг/м^3 (получена как среднее арифметическое из плотностей слагающих его фракций).

Кажущаяся плотность $\rho_{каж.бр.}$ – плотность его материала, учитывающая объем закрытых пор, но не учитывающая открытых пор, сообщающихся с внешней средой. В случае с сырьем $\rho_{каж.бр.}$ = 1392,43 кг/м^3 (получена как среднее арифметическое из плотностей слагающих его фракций).

Насыпная плотность $\rho_{нас.бр.}$ – плотность, относящаяся к массе материала в рыхлом состоянии с учетом межзерновых пустот. В случае с сырьем $\rho_{нас.бр.}$ =765,14 кг/м^3 (также получена как среднее арифметическое из плотностей слагающих его фракций).

II. Расчет общей (истинной) пористости брикетов.

Общая пористость ($\Pi_{общ.}$) показывает долю объема пор от общего объема материала и рассчитывается по формуле:

$$\Pi_{общ.} = \left(1 - \frac{\rho_{каж.бр.}}{\rho_{ист.бр.}}\right) \times 100\%. \quad (1)$$

Подставляем значения и получаем

$$\Pi_{общ.} = \left(1 - \frac{1392,43}{1550,00}\right) \times 100\% = (1 - 0,8983) \times 100 = 10,17\%.$$

Таким образом, общая пористость брикета составляет 10,17%, и это означает, что около 10% всего объема брикета занимают поры (как открытые, так и закрытые).

III. Расчет нахождения объема брикетов.

При расчете объема образца (брикета) также проверим корректность расчета общей (истинной) пористости, сопоставив найденный объем с массой брикета ($m_{брик.}$ = = 28,5 гр.).

1. Определение объема брикета ($V_{брик.}$) находим через кажущуюся плотность (так как расчет через кажущуюся плотность учитывает объем пор внутри брикета):

$$V_{брик.} = \frac{m_{брик.}}{\rho_{каж.бр.}} = \frac{0,0285 \text{ кг}}{1392,43 \text{ кг/м}^3} \approx$$

$$\approx 0,00002047 \text{ м}^3 = 20,47 \text{ см}^3.$$

2. Определение объема брикета как твердого тела ($V_{тв.}$) при вычислении через истинную плотность:

$$V_{тв.} = \frac{m_{брик.}}{\rho_{ист.бр.}} = \frac{0,0285 \text{ кг}}{1550,00 \text{ кг/м}^3} \approx$$

$$\approx 0,00001839 \text{ м}^3 = 18,39 \text{ см}^3.$$

3. Объем пор ($V_{пор.}$) определяется как разница:

$$V_{пор.} = V_{брик.} - V_{тв.} = 20,47 - 18,39 = 2,08 \text{ см}^3.$$

4. Определение пористости через объемы по формуле:

$$\Pi_{общ.} = \frac{V_{пор.}}{V_{брик.}} * 100\%. \quad (2)$$

Рассчитывая пористость через объемы, получаем

$$\Pi_{общ.} = \frac{2,08}{20,47} * 100\% = 10,17\%.$$

Результаты определения пористости совпадают, что подтверждает корректность вычислений.

IV. Расчет нахождения открытой и закрытой пористости брикетов.

Для расчета объема пор, сообщающихся с внешней средой (т.н. открытых пор), воспользуемся следующей формулой:

$$\Pi_{откр.} = \frac{m_{нас.} - m_{сух.}}{V_{брик.}} \times 100\%, \quad (3)$$

где: $m_{нас.}$ – масса насыщенного водой брикета ($m_{нас.}$ = 30,21 гр.); $m_{сух.}$ – масса сухого брикета ($m_{сух.}$ = = 28,5 гр.); $V_{брик.}$ – объем брикета.

Рассчитывая открытую пористость через массы, получаем

$$\Pi_{откр.} = \frac{30,21 - 28,50}{20,47} \times 100\% = 8,35\%.$$

Закрытая пористость вычисляется как разность между общей и открытой пористостью по следующей формуле:

$$П_{закр.} = П_{общ.} - П_{откр.} \quad (4)$$

Поэтому закрытая пористость равна:

$П_{закр.}$ = 10,17% – 8,35% = 1,82%.

V. Расчет нахождения площадей образующей (поперечного сечения) и поверхностей брикета (расчет через коэффициент формы).

Форма получаемого брикета сложная – скругленно-обтекаемая, подушкообразная, не имеющая точной формулы для ее нахождения. Поэтому воспользуемся инженерно-физическими способами отыскания поперечного сечения (контактной поверхности) и общей и удельной поверхностей брикета [13, 14]. Так как $V_{брик.} = \frac{m_{брик.}}{\rho_{каж.бр}}$ = 20,47 см^3, то по принципу подобия найдем т.н. коэффициент формы ($K_ф$), используя в качестве основы формулу для вычисления объема параллелепипеда ($V_{осн.}$):

$$V_{осн.} = a \times b \times c, \quad (5)$$

где: a, b, c – физические размеры брикета: его длина, a = 50 мм = 0,05 м; его ширина, b = 40 мм = 0,04 м; его высота, c = 25 мм = 0,025 м. Вычисление основы без учета формы дает:

$$V_{осн.} = a \times b \times c = 0{,}05 \times 0{,}04 \times 0{,}025 = 0{,}00005 \text{ м}^3 = 50 \text{ см}^3.$$

Из полученных данных вычисляем коэффициент формы:

$$K_ф = \frac{V_{брик.}}{V_{осн.}} = \frac{20{,}47}{50{,}00} = 0{,}4094.$$

Зная $K_ф$, легко найти площадь поперечного сечения (контактную поверхность прессования) воспользовавшись следующей формулой:

$$S_{попер.} = a \times b \times K_ф. \quad (6)$$

Поэтому $S_{попер.}$ = 0,05 × 0,04 × 0,4094 = 0,0008188 м^2 ≈ ≈ 8,2 см^2.

Также, зная $K_ф$, определим общую площадь поверхности брикета ($S_{пов.бр.}$), взяв за основу вычисления для параллелепипеда аналогичных размеров, с расчетом общей поверхности как удвоенной суммы площадей, умноженной на коэффициент формы:

$$S_{пов.бр.} = (2((a \times b) + (a \times c) + (b \times c))) \times K_ф. \quad (7)$$

Поэтому $S_{пов.бр.}$ = (2(0,002 + 0,00125 + 0,001)) × 0,4094 = = 0,0034799 м^2 ≈ 34,8 см^2.

Найденные расчетным путем общая площадь поверхности и объем брикета также позволяют определить и удельную площадь ($S_{уд.бр.}$) его поверхности как важный параметр, характеризующий процесс горения – отношение площади поверхности к объему:

$$S_{уд.бр.} = \frac{S_{пов.бр.}}{V_{брик.}}, \text{ см}^{-1}. \quad (8)$$

Поэтому $S_{уд.бр.} = \frac{34{,}8}{20{,}47}$ = 1,7 см$^{-1}$. Это означает, что на каждый кубический сантиметр объема приходится 1,7 см^2 поверхности, что обеспечивает достаточный контакт с окислителем при горении [15].

Таким образом, принятая плотность (учитывающая внутреннюю пористость) $\rho_{каж.бр.}$ = 1392,43 кг/м^3 – достаточно высокая, характерная для качественного окускованного топлива; общая пористость ($П_{общ.}$ = 10,17%) – является умеренным значением для топливных брикетов. В целом приведенный параметр положительно влияет на прочностные качества брикетов, скорость их горения (достаточный доступ кислорода) и влагопоглощения. Значительные отличия насыпной ($\rho_{нас.бр.}$) от кажущейся ($\rho_{каж.бр.}$) плотности (около 627 кг/м^3) брикетов обусловлены межзерновыми пустотами в насыпном слое материала [16].

РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВАЛЬЦОВОГО ПРЕССА ДЛЯ ВЫРАБОТКИ БРИКЕТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ХВОСТОВ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ И ЛИГНИНСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ

I. Расчет нахождения часового количества брикетного выпуска (шт./ч).

За основу принимаем паспортную часовую производительность оборудования (пресса), составляющую 500 кг/ч (Q = 500 кг/ч). В расчете также используем полученное лабораторно-аналитическим путем значение средней массы сухого брикета, составляющей $m_{ср.бр.}$ = 28,5 гр., поэтому, зная объем брикета $V_{брик.}$ = 20,47 см^3, находим его усредненную плотность: $\rho_{уср.бр.} \frac{m_{ср.бр.}}{V_{брик.}} = \frac{28{,}5}{20{,}47} =$ = 1,3923 гр/см^3 (1392,23 кг/м^3), совпадающую с кажущейся (учитывающей внутреннюю пористость) плотностью ($\rho_{каж.бр.}$ = 1392,43 кг/ м^3). Поэтому количество вырабатываемых брикетов за час работы составит:

$$N_{бр.практ.} = \frac{Q}{m_{ср.бр.}} = \frac{500}{0{,}0285} \approx 17544 \text{ шт./ч.}$$

Количество выпускаемых за час непрерывной работы брикетов составит ≈ 17544 шт.

II. Расчет нахождения КПД брикетного выпуска по количеству ячеек и частоте вращения вальцов (Расчет коэффициента заполнения ячеек).

Вновь обращаемся к паспортным характеристикам пресса и принимаем за основу частоту вращения вальцов-барабанов, составляющую $n_{вальц.}$ = 12 об/мин. Значит, за час непрерывной работы вальцы совершат: $n_{час}$ = 12 × 60 = = 720 об./ч. В расчете также используем фактические данные об общем количестве прессующих ячеек, расположенных на вальцах и составляющих 63 шт. на каждом вальце-барабане (т.е. три шт. в ряд и 21 шт. по окружности). Значит, теоретическое количество брикетов, прессуемое за один полный оборот синхронно движущихся навстречу друг другу (благодаря наличию цилиндрических зубчатых колес, расположенных по образующим барабанов) валь-

цов при полном их заполнении составляет 63 шт. Поэтому определяем теоретически возможное часовое количество брикетов (шт./ч):

$$N_{\text{бр.теорет.}} = 63 \times 720 = 45360 \text{ шт./ч.}$$

Из данных о практической и теоретической производительности находим коэффициент заполнения ячеек ($K_{\text{зап.яч.}}$), составляющий:

$$K_{\text{зап.яч.}} = \frac{N_{\text{бр.практ.}}}{N_{\text{бр.теорет.}}} = \frac{17544}{45360} = 0,387.$$

Таким образом, определяем КПД брикетного выпуска, составляющий:

$$\eta_{\text{бр.вып.}} = K_{\text{зап.яч.}} \times 100\%. \quad (9)$$

Определив КПД процесса (пресса), равным $\eta_{\text{бр.вып.}}$ = 0,387 × 100% = 38,7%, делаем вывод о том, что часть ячеек либо не заполняется полностью (явление проскока), либо присутствуют паузы в подаче сырья.

III. Расчет нахождения производительности гравитационного бункера-питателя (по разовой загрузке).

Бункер-питатель представляет собой перевернутую усеченную пирамиду со следующими размерами: высотой, равной 0,28 м; длиной и шириной верхней (загрузочной) части, равной 0,46×0,40 м, а нижней (предвальцовой, подающей) части – 0,29×0,17 м. Поэтому для нахождения его объема используем формулу объема усеченной пирамиды:

$$V_{\text{бунк.}} = \frac{H}{3}\left(S_{\text{загр.}} + S_{\text{под.}} + \sqrt{S_{\text{загр.}} * S_{\text{под.}}}\right), \quad (10)$$

где: H = 0,28 м – высота бункера; $S_{\text{загр.}}$ = 0,46 × 0,40 = 0,184 м^2 – площадь верхнего (загрузочного) основания; $S_{\text{под.}}$ = 0,29 × 0,17 = 0,0493 м^2 – площадь нижнего (подающего) основания.

Определяем объем бункера

$$V_{\text{бунк.}} = \frac{0,28}{3}\left(0,184 + 0,0493 + \sqrt{0,184 * 0,0493}\right) =$$

$$= 0,0933 \times 0,3285 = 0,0307 \approx 0,031 \text{ м}^3$$

Поэтому при средней насыпной плотности сырья, равной $\rho_{\text{нас.бр.}}$ = 765,14 кг/м^3, масса разовой загрузки составит: $m_{\text{раз.}} = \rho_{\text{нас.бр.}} \times V_{\text{бунк.}}$ = 765,14 × 0,031 = 23,72 кг. Таким образом, при непрерывной часовой работе потребуется 500 / 23,72 ≈ 21 загрузка бункера, т.е. примерно 1 раз в 3 мин.

IV. Расчет вычисления производительности пресса (кг/ч).

Теоретическая часовая производительность пресса $Q_{\text{теор.}}$(кг/ч) можно рассчитать по следующей эмпирической формуле [9, 10, 17]:

$$Q_{\text{теор.}} = 60 \times \pi \times D \times b \times h\, n_{\text{вальц.}} \times k \times \rho_{\text{нас.бр.}}, \quad (11)$$

где: D = 0,3 м – диаметр вальцов; b = 0,16 м – ширина вальцов (барабанов); h = толщина слоя сырьевого материала, находящегося перед вальцами (в расчетах принимается за 0,01 м); $n_{\text{вальц.}}$ = 12 об/мин; k – коэффициент заполнения (из практики [18, 19], равный 0,5-0,7), поэтому принимаемый нами k = 0,6.

Тогда теоретическая часовая производительность пресса, $Q_{\text{теор.}}$ (кг/ч) равна:

$$Q_{\text{теор.}} = 60 \times 3,14 \times 0,3 \times 0,16 \times 0,01 \times 12 \times$$
$$\times 0,6 \times 765,14 = 498,2 (\approx 500 \text{ кг/ч}).$$

Таким образом, рассчитанная теоретическая производительность пресса равна практической (паспортной) производительности, составляющей 500 кг/час (Q = 500 кг/ч).

V. Расчет нахождения окружной скорости вальцов (м/с).

Расчет нахождения окружной скорости вальцов производится из условия их синхронной работы по следующей формуле

$$\vec{\upsilon}_{\text{окр.синхр.}} = \frac{\pi D n_{\text{вальц.}}}{60}, \quad (12)$$

где: D = 0,3 м – диаметр вальцов; $n_{\text{вальц.}}$ = 12 об/мин.

Подставляем значения и находим

$$\vec{\upsilon}_{\text{окр.синхр.}} = \frac{3,14 * 0,3 * 12}{60} = 0,1884 \text{ м/с.}$$

Данное скоростное значение показывает, что для большей производительности (с получением прочной продукции) требуются малые скорости вращения вальцов [20, 21].

VI. Расчет нахождения передаточных отношений и крутящего момента вальцового пресса.

Так как для процесса прессования брикетов нужны малые скорости вращения вальцов (для высокой и стабильной производительности), а также значительные усилия прессования, развиваемые прессом (для получения прочной продукции) при весьма ограниченной мощности его силовой установки (всего 4,0 кВт), то закономерным решением поставленной задачи является установка промежуточного, понижающего обороты и резко увеличивающего общий крутящий момент силового звена, конструктивно реализованного в виде многоступенчатого сложного механизма, понижающего частоту вращения [17, 22] на входе (первой ступени), состоящего из понижающей клиноременной передачи (с паспортным передаточным отношением, равным 3) и связанной (находящейся на общем ведомом валу) с ней коробки передач (второй ступени), реализованной в виде многоступенчатого зубчатого редуктора (с паспортным передаточным отношением, равным 40,17), поэтому:

$$i_{\text{общ.расч.}} = i_{\text{рем.пер.}} \times i_{\text{зубч.пер.}} = 3 \times 40,17 = 120,51.$$

Так как частота вращения асинхронного электродвигателя составляет $n_{\text{двиг.}}$ = 1450 об/мин, а частота вращения вальцов $n_{\text{вальц.}}$ = 12 об/мин, то проверка передаточного отношения дает:

$$i_{\text{общ.}} = \frac{n_{\text{двиг.}}}{n_{\text{вальц.}}} = \frac{1450}{12} = 120,83.$$

Столь малая разница с расчетным значением объясняется только округлением (в третьем после запятой разряде) его передаточного числа в клиноременной передаче.

VII. Расчет нахождения крутящего момента, развиваемого на двигателе пресса.

Крутящий момент, развиваемый на валу электродвигателя, определяется по формуле:

$$M_{\text{двиг.}} = \frac{N_{\text{двиг.}} * 1000}{\omega_{\text{двиг.}}}, \quad (13)$$

где: $\omega_{\text{двиг.}}$ – угловая скорость вращения вала двигателя (рад/с); $N_{\text{двиг.}}$ – мощность двигателя (кВт).

В свою очередь угловая скорость вращения вала двигателя определяется по следующей формуле:

$$\omega_{\text{двиг.}} = (2\pi * n_{\text{двиг.}})/60, \quad (14)$$

где: $n_{\text{двиг.}}$ – частота вращения вала двигателя (об/мин).

Таким образом, угловая скорость равна:

$$\omega_{\text{двиг.}} = (2*3{,}14*1450)/60 = 151{,}77 \text{ рад/с}.$$

Тогда крутящий момент, развиваемый на валу двигателя, равен:

$$M_{\text{двиг.}} = (4*1000)/151{,}77 = 26{,}36 \text{ Нм}.$$

Так как крутящий момент от двигателя к вальцам передается через механическую систему, состоящую из клиноременной передачи и двухступенчатого зубчатого редуктора, то часть мощности и крутящего момента неизбежно теряется на трение в передачах [20, 21, 22, 23]. Поэтому мощность и крутящий момент, поступающие от двигателя к вальцам, рассчитываются через КПД передач:

1. Принимаем КПД клиноременной передачи равным 0,95 (95%);

2. Принимаем КПД зубчатой передачи на одну ступень равным 0,98 (98%). Так как коробка передач (редуктор) двухступенчатая, тогда 0,98 × 0,98 = 0,96.

Поэтому общий КПД передаточной системы будет равен:

$$\eta_{\text{общ.}} = \eta_{\text{клинор.}} \times \eta_{\text{редукт.}} = 0{,}95 \times 0{,}96 = 0{,}91 \ (91\%).$$

Таким образом, полезная мощность, поступающая от вала двигателя к вальцам, составит:

$$N_{\text{двиг.полезн.}} = N_{\text{двиг.}} \times \eta_{\text{общ.}} = 4{,}0 \times 0{,}91 = 3{,}64 \text{ кВт}.$$

Тогда как крутящий момент, подаваемый от двигателя к вальцам, с учетом КПД передач и общего передаточного отношения ($i_{\text{общ.}}$) будет иметь следующую формулу:

$$M_{\text{вальц.}} = M_{\text{двиг.}} \times i_{\text{общ.}} \times \eta_{\text{общ.}} \quad (15)$$

Подставив значения, получаем:

$$M_{\text{вальц.}} = 26{,}36 \times 120{,}83 \times 0{,}91 \approx 2900 \text{ Нм}.$$

VIII. Расчет нахождения усилия и давления прессования.

Рассчитываем усилие, создаваемое крутящим моментом (образуемым двигателем и передаточной системой), по следующей формуле:

$$\vec{F}_{\text{прессов.}} = \frac{M_{\text{вальц.}}}{r_{\text{вальц.}}}, \quad (16)$$

где: $r_{\text{вальц.}}$ – радиус вальцов ($r_{\text{вальц.}} = D/2 = 0{,}15$ м).

Тогда $\vec{F}_{\text{прессов.}} = 2900/0{,}15 = 19\,333{,}3$ Н (19,33 кН).

Данное усилие равномерно распределяется на все ячейки одновременно, находящиеся в зоне прессования, при синхронном движении вальцов навстречу друг к другу. Т.е. это усилие распределяется на три брикета одновременно, образующих один элементарный ряд вдоль ширины вальцов (длины образующей). Всего таких элементарных рядов – 21 по окружности каждого вальца (т.е. по 63 брикетирующих ячейки на каждом).

Площадь поперечного сечения (контактная поверхность прессования) была вычислена ранее и составила $S_{\text{попер.}} \approx 8{,}2$ см^2. Поэтому рассчитываем общую площадь прессования для трех брикетов (одного элементарного ряда):

$$S_{\text{общ.}} = S_{\text{попер.}} \times 3 = 0{,}0008188 \text{ м}^2 \times 3 = 0{,}00246 \text{ м}^2.$$

Тогда расчетное давление прессования элементарного ряда (трех брикетов) составит:

$$P_{\text{расч.ряд.}} = \frac{\vec{F}_{\text{пресс.}}}{S_{\text{общ.}}} = \frac{19333{,}33}{0{,}00246} = 7859077{,}24 \approx 7{,}86 \text{ МПА}.$$

Таким образом, давление прессования элементарного ряда, состоящего из трех брикетов, равно 7,86 МПа.

Но, исходя из площади поперечного сечения одного из трех брикетов и непротиворечивости расчетным условиям, можно сделать вывод о том, что единичный брикет в элементарном ряду прессуется давлением, равным:

$$P_{\text{расч.ряд.}} = \frac{P_{\text{брик.}}}{3},$$

откуда $P_{\text{брик.}} = P_{\text{расч.ряд}} \times 3 = 7{,}86 \times 3 = 23{,}6$ МПа.

Значит, давление прессования единичного брикета на вальцовом прессовом оборудовании составляет 23,6 МПа.

В связи с тем, что процесс прессования на вальцовых прессах имеет динамический характер, в справочной литературе [9, 10, 11, 12, 16, 24] часто упоминают, что среднее (развиваемое подобным типом прессового оборудования) давление находится в диапазоне 50-200 МПа, понимая под этой формулировкой давление прессования за один полный оборот вальцов (вальцовой системы), т.е. о совокупном давлении, развиваемым системой за определенный временной (в нашем случае 5 с) интервал. Так вот, если на прессующей (вальцовой) поверхности (по ее окружности) расположен 21 элементарный ряд, составляющий три брикета, то (теоретически) развиваемое за полный оборот вальцов давление составит: $P_{\text{полн.теор.}} = 21 \times P_{\text{расч.ряд}} = 21 \times 7{,}86 = 165{,}06$ МПа, а с учетом реального КПД прессового оборудования ($\eta_{\text{бр.вып.}} = 38{,}7\%$) получается: $P_{\text{полн.практ.}} = P_{\text{полн.теор.}} \times \eta_{\text{бр.вып.}} = 165{,}06 \times 0{,}387 = 63{,}88$ МПа. Так как элементарный ряд состоит из трех брикетов, значит, приходящееся на единичный брикет (развиваемое за полный оборот вальцов) давление равно: $P_{\text{разв.брик.}} = P_{\text{полн.практ.}}/3 = 63{,}88/3 = 21{,}3$ МПа (что близко по значению расчетному давлению прессования единичного брикета $P_{\text{брик.}} = 23{,}6$ МПа). Таким образом, полученное расчетным моделированием развиваемое прессом полное (за оборот

вальцов) давление ($P_{полн.практ.}$ = 63,88 МПа) лежит внутри обозначенного (50-200 МПа) диапазона.

IX. Расчет нахождения времени прессования (выпуска) брикета.

Для того чтобы рассчитать время прессования брикета, определяем время полного оборота вальцов:

$$t_{об.вальц.} = \frac{60}{n_{вальц.}} = \frac{60}{12} = 5 \text{ с.}$$

Так как вальцы, синхронно движущиеся навстречу друг к другу совершают один полный оборот за 5 секунд, то время нахождения 3 ячеек (образующих элементарный ряд) в зоне прессования (для 21 ячейки по окружности) составляет:

$$t_{пресс.} = \frac{t_{об.вальц.}}{21} = \frac{5}{21} \approx 0,24 \text{ с.}$$

Таким образом, время прессования одного элементарного ряда (состоящего из 3 брикетов) равно 0,24 с, что является типичным значением для большинства вальцовых прессов (0,2-0,4 с), при этом время прессования единичного брикета не превышает значения: $t_{пресс.}/3 = 24/3 =$ = 0,08 с т.е. укладывается в интервал 0,1 с.

Проверку вычисленного значения расчетного времени (0,08 с) легко провести сравнением с ранее найденными теоретическим и практическим (с учетом КПД пресса) часовым выпуском брикетов. Так, теоретически часовой выпуск брикетов (шт./ч) составит: $N_{час.теор.} = 3600/0,08 =$ = 45000 шт./ч, что согласуется с $N_{бр.теорет.}$ = 45360 шт./ч (небольшая разница объясняется округлением времени прессования в третьем после запятой разряде). Практический часовой выпуск (с учетом КПД прессового оборудования) составляет: $N_{час.практ.} = 3600/0,08 \times 0,387 = 17415$ шт./ч, что согласуется с $N_{бр.практ.} \approx$ 17544 шт./ч (небольшая разница опять же объясняется округлением времени прессования в третьем после запятой разряде).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного инженерно-физического моделирования были получены следующие основные результаты: лабораторно-аналитическими методами исследований установлены: действительная, кажущаяся и насыпная плотности сырья, составившие: $\rho_{ист.бр.}$ = 1550 кг/м^3; $\rho_{каж.бр.}$ = 1392,43 кг/м^3; $\rho_{нас.бр.}$ = 765,14 кг/м^3, причем $\rho_{каж.бр.} = \rho_{уср.бр.}$ усредненной (полученной расчетным путем) плотности. Общая пористость брикета составила $П_{общ.}$ = 10,17%, т.е. установлено, что около 10% всего объема брикета занимают поры (как открытые, так и закрытые). Объем брикета составил: $V_{брик.}$ = 20,47 см^3, а площадь поперечного сечения (контактная поверхность) $S_{попер.}$ = 8,2 см^2, при этом общая и удельная поверхности равны: $S_{пов.бр.}$ = 34,8 см^2, а $S_{уд.бр.}$ = 1,7 см$^{-1}$, что означает, что на каждый кубический сантиметр объема приходится 1,7 см^2 поверхности, что обеспечивает достаточный контакт с окислителем при сжигании. Вычислительными методами установлены фактическая и теоретическая производительности прессового оборудования, составившие: $N_{бр.практ.}$ = 17544 шт./ч; $N_{бр.теорет.}$ = 45 360 шт./ч. На основании изложенного подсчитан практический КПД пресса, равный: $\eta_{бр.вып.}$ = 38,7%. Расчетным путем установлен объем питающего бункера, составивший: $V_{бунк.} = 0,0307 \approx 0,031$ м^3, а также масса разовой загрузки: $m_{раз.}$ = 23,72 кг; показано, что при непрерывной часовой работе потребуется 21 загрузка бункера, т.е. примерно 1 раз в 3 мин. Найдено расчетное значение теоретической производительности пресса: $Q_{теор.}$ = 498,2 (≈ 500 кг/ч), равной паспортной производительности (Q = 500 кг/ч). Вычислена окружная скорость вальцов: $\vec{\upsilon}_{окр.синхр.}$ = 0,1884 м/с, показывающая, что для большой производительности (с получением прочной продукции) требуются малые скорости их вращения. Найдено общее передаточное соотношение системы, составившее: $i_{общ.}$ = 120,83; причем расчетные и теоретические значения равны. Вычислены крутящие моменты двигателя: $M_{двиг.}$ = 26,36 Нм, а также (с учетом КПД передаточных систем) вальцов: $M_{вальц.}$ = 2900 Нм. Установлены усилие: $\vec{F}_{прессов.}$ = 19 333,3 Н (19,33 кН) и давления прессования, составившие для прессуемого ряда: $P_{расч.ряд} = 7859077,24 \approx$ 7,86 МПа, а для единичного брикета $P_{брик.}$ = 23,6 МПа. Расчетным моделированием доказано, что развиваемое прессом полное (за оборот вальцов) давление, равное $P_{полн.практ.}$ = 63,88 МПа лежит внутри диапазона давления, развиваемого подобным типом прессового оборудования, составляющего 50-200 МПа. Также рассчитано и проверено время прессования (выпуска) единичного брикета, составившее $t_{пресс.}$ = 0,08 с, что является типичным значением для большинства вальцовых прессов.

Таким образом, при использовании представленного способа брикетирования были получены прочные и плотные топливные брикеты, пригодные для длительного хранения и транспортировки, а также использования в бытовых и промышленных топках в качестве твердого топлива.

Список литературы • References

1. Няшина Г.С., Курганкина М.А., Стрижак П.А. Экологические, экономические и энергетические преимущества использования отходов угле- и нефтепереработки вместо угля для получения того же количества энергии // Преобразование энергии. 2018;(174):175-187. DOI: 10.1016/j. enconman.2018.08.048.
   Nyashina G.S., Kurgankina M.A., Strizhak P.A. Ecological, economic and energy advantages of using coal and oil refining waste instead of coal to produce the same amount of energy. *Energy conversion*. 2018;(174):175-187. (In Russ.). DOI: 10.1016/J. enconman.2018.08.048.
2. Заостровский А.Н., Папин А.В., Игнатова А.Ю. Использование лигнина в качестве связующего при брикетировании угольных отходов // Химия твердого топлива. 2017;(4):45–50.
   Zaostrovsky A.N., Papin A.V., Ignatova A.Yu. The use of lignin as a binder in briquetting coal waste. *Chemistry of solid fuels*. 2017;(4): 45-50. (In Russ.).
3. Zhang G., Sun Y., Xu Y. Review of briquette binders and briquetting mechanism. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;(82):477-487. DOI: 10.1016/j.rser. 2017.09.072.
4. Смирнов А.Н., Иванов П.С. Инженерные методы расчета процессов прессования сыпучих материалов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2019;(7):22-26.

Smirnov A.N., Ivanov P.S. Engineering methods for calculating the processes of pressing bulk materials. *Chemical and oil and gas engineering*. 2019;(7):22–26. (In Russ.).

5. Руденко К.Г., Бондарев Б.И. Теория брикетирования дисперсных материалов. М.: Недра, 1967. 256 с.
6. Кондратенко А.С., Буянтуев С.Л. К вопросу изучения некоторых характеристик углешламов Тугнуйской ЦОФ // Международный научно-исследовательский журнал. 2022;11(125). DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.31.
   Kondratenko A.S., Buyantuev S.L. On the issue of studying of some characteristics of coal sludge from the Tugnuysk concentrating mill. *International Scientific Research Journal*. 2022;11(125). (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.31
7. Тайц Е.М., Андреева И.А. Методы анализа и испытания углей. М.: Недра, 1983. 301 с.
8. Стандартные методы испытания углей. Классификации углей / И.В. Августевич, Т.М. Броновец, Г.С. Головин и др. М.: Трек, 2008. 368 с.
9. Ковалев В.А., Смирнов В.И. Брикетирование угольных материалов: теория и практика. СПб.: Наука, 2005. 320 с.
10. Елишевич А.Т. Брикетирование полезных ископаемых. М.: Недра, 1989. 300 с.
11. Перспективные технологии переработки угольных шламов. Под ред. В.А. Рубцова. Новосибирск: СО РАН, 2014. 280 с.
12. Кондратенко А.С. Исследование свойств хвостов углеобогащения как вторичного сырья для получения окускованного топлива // Уголь. 2025;(5):49-55. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-5-49-55.
    Kondratenko A.S. Studying the properties of coal washing tailings as a secondary raw material for production of pelletized fuel. *Ugol'*. 2025;(5):49-55. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-5-49-55.
13. Островский Г.М. Прикладная механика неоднородных сред. СПб.: Наука, 2000. 359 с.
14. Яворский Б.М., Детлаф А.А., Лебедев А К. Справочник по физике. М.: ОНИКС, 2006. 1056 с. (разделы по механике твердого тела).
15. Урьев Б.Н. Физико-химическая динамика дисперсных систем и материалов. М.: Интеллект, 2013. 232 с.
16. Получение угольных брикетов и определение их физико-химических свойств / М.И. Тулепов, Л.Р. Сасыкова, А.Р. Керимкулова и др., // Oriental Journal of Chemistry. 2019;35(1):180-185. DOI: 10.13005/ ojc/350120.
    Tulepov M.I., Sasykova L.R., Kerimkulova A.R., Tureshova G.O., Tolep D.M., Zhapekova A.O. Preparation of coal briquettes and determination of their physico-chemical properties. *Oriental Journal of Chemistry*. 2019;35(1):180-185. (In Russ.). DOI: 10.13005/ojc/350120.
17. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1988. 640 с.
18. Вайсберг Л.А., Демидов И.В., Иванов К.С. Механика сыпучих сред при вибрационных воздействиях: методы описания и математического моделирования // Обогащение руд. 2015;(4):21-31. DOI: 10.17580/or.2015.04.05.
    Vaisberg L.A., Demidov I.V., Ivanov K.S. Mechanics of bulk media under vibration: methods of description and mathematical modeling. *Ore processing*. 2015;(4):21-31. (In Russ.). DOI: 10.17580/or.2015.04.05.
19. Макаров Ю.И. Смешение сыпучих материалов. М.: Химия, 1977. 272 с.
20. Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики. В двух томах. СПб.: Изд-во «Лань», 2002. 736 с.
21. Бать М.И., Джанелидзе Г.Ю., Кельзон А.С. Теоретическая механика в примерах и задачах: Учеб. пособие для студентов технических вузов. 10-е изд., перераб. и доп. СПб.: Политехника, 1995. 670 с.
22. Кореняко А.С. Курсовое проектирование по теории механизмов и машин. М.: Наука, 1970. 585 с.
23. Калашников С.Н., Калашников А.С. Зубчатые колеса и их изготовление. М., 1983. 278 с.
24. Горюнов Ю.В., Пильщиков В.И., Сатаев И.К. Физико-химические основы брикетирования углей. М.: Недра, 1980. 184 с.

Authors Information

Kondratenko A.S. – PhD (Engineering), Senior Researcher, Banzarov Buryat State University, Ulan-Ude, 670000, Russian Federation, e-mail: cubanit@yandex.ru

Kalashnikov V.A. – Director, Tugnui Processing Plant", Village Sagan-Nur, 671353, Republic of Buryatia, Russian Federation, e-mail: KalashnikovVAn@suek.ru

Zherlova N.V. – Chief Technologist, Tugnui Processing Plant", Village Sagan-Nur, 671353, Republic of Buryatia, Russian Federation, e-mail: GherlovaNV@suek.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 1.09.2026
Поступила после рецензирования: 17.09.2026
Принята к публикации: 30.09.2026

Paper info

Received September 1, 2026
Reviewed September 17, 2026
Accepted September 30, 2026