

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 662.8

EDN: VXLHIU

DOI: 10.21285/1814-3520-2026-3-481-490



Численное исследование влияния условий термоподготовки черемховского угля на свойства топливных брикетов

В.Г. Галеев¹, И.Г. Донской^{2✉}, А.Н. Козлов³, М.В. Пензик⁴, Ю.М. Иса⁵

¹⁻⁴Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Российская Федерация

⁵Университет Витватерсранда, Йоханнесбург, Южно-Африканская Республика

Резюме. Цель – исследовать стадию пиролиза (полукоксования) угольной засыпки для получения брикетов, которые далее могут использоваться в виде твердого топлива или в качестве сырья для производства углеродистых материалов. Объектом исследований явился черемховский уголь (влажность – 10 %, выход летучих – 38,7 %, зольность – 30,2 %). Процесс пиролиза засыпок слабоспекающегося угля проводили в лабораторной муфельной печи при нагреве до температуры 300–400 °С, после чего производилось прессование под давлением ≈ 20 МПа. В работе использовалось численное моделирование кинетики термического разложения и теплопереноса. Показано, что полученные при 300–350 °С брикеты имеют прочность ≈ 95 %, в то время как при температурах выше 350 °С брикеты рассыпаются на стадии прессования. Установлено, что прочность угольных брикетов в основном определяется тепловым состоянием засыпки, а именно: однородностью ее прогрева и степенью термического разложения по высоте слоя частиц. Для оценки однородности прогрева и разложения предложена упрощенная математическая модель, описывающая распространение теплоты и протекание двухстадийной эндотермической брутто-реакции (размягчение угля и превращение его в полукок) в одномерном приближении. Сформулирован числовой критерий (коэффициент осцилляции), учитывающий неоднородность профиля конверсии по слою: при больших его значениях ожидаемая прочность брикета будет низкой. Проведенное качественное сравнение экспериментальных данных с оценками по разным критериям (однородность состояния массы засыпки, энергетические затраты) показало, что математическая модель достаточно хорошо описывает процесс термоподготовки угля. Таким образом, проведенные расчеты показывают, что значения температур, соответствующих наилучшей прочности брикетов на основе черемховского угля, ограничиваются областью температур в диапазоне 300–320 °С при времени нагрева ≈ 1 ч. Тепловые затраты на производство брикетов при этом составляют 2–3 МДж/кг угля.

Ключевые слова: угольные брикеты, полукоксование, пиролиз, механическая прочность, математическое моделирование

Финансирование. Работа выполнена в рамках проекта Минобрнауки РФ № 13.2251.21.0254 (эл. бюджет № 075-15-2024-651).

Для цитирования: Галеев В.Г., Донской И.Г., Козлов А.Г., Пензик М.В., Иса Ю.М. Численное исследование влияния условий термоподготовки черемховского угля на свойства топливных брикетов // iPolytech Journal. 2026. Т. 30. № 3. С. 481–490 <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-3-481-490>. EDN: VXLHIU.

POWER ENGINEERING

Original article

Numerical analysis of the effects of Cheremkhovo coal thermal pretreatment on fuel briquette properties

Vladislav G. Galeev¹, Igor G. Donskoy^{2✉}, Aleksandr N. Kozlov³,
Maksim V. Penzik⁴, Yusuf M. Isa⁵

¹⁻⁴Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

⁵University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa

Abstract. The pyrolysis (low-temperature carbonization) of a coal bed was investigated to determine conditions for producing briquettes suitable for use as solid fuel or as feedstock for carbon materials. The study used Cheremkhovo coal (Irkutsk coal basin, Russia) with a moisture content of 10 %, volatile matter yield of 38.7 %, and ash content of 30.2 %. Beds of weakly caking coal were pyrolyzed in a laboratory muffle furnace

at 300–400 °C and subsequently pressed at approximately 20 MPa. Numerical modeling was used to describe the kinetics of thermal decomposition and heat transfer. Briquettes produced at 300–350 °C had a strength of approximately 95%, whereas those produced above 350 °C disintegrated during pressing. Briquette strength was found to depend primarily on the thermal state of the coal bed, specifically on the uniformity of heating and the degree of thermal decomposition throughout the bed height. A simplified mathematical model was developed to evaluate the uniformity of heating and decomposition. In a one-dimensional approximation, the model describes heat transfer and a two-stage endothermic overall reaction comprising coal softening followed by conversion to semicoke. An oscillation index was introduced as a numerical criterion that accounts for nonuniformity in the conversion profile throughout the bed height; high index values indicate low expected briquette strength. Qualitative comparison of the experimental data with estimates based on different criteria, including the uniformity of the coal-bed state and energy consumption, showed that the mathematical model adequately describes the thermal pretreatment of coal. The calculations indicate that the highest strength of Cheremkhovo coal briquettes is achieved at temperatures of 300–320 °C with a heating time of approximately 1 h. The corresponding energy consumption for briquette production is 2–3 MJ/kg of coal.

Keywords: coal briquettes, semi-coking, pyrolysis, mechanical strength, mathematical modeling

Funding. The work was supported by the Russian Ministry of Education and Science project No. 13.2251.21.0254 (electronic budget No. 075-15-2024-651).

For citation: Galeev V.G., Donskoy I.G., Kozlov A.N., Penzik M.V., Isa Yu.M. Numerical analysis of the effects of Cheremkhovo coal thermal pretreatment on fuel briquette properties. *iPolytech Journal*. 2026;30(3):481-490. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-3-481-490>. EDN: VXLHIU.

ВВЕДЕНИЕ

Угольные брикеты широко используются в энергетике и других отраслях промышленности как бездымное топливо и как сырье для получения высокоуглеродистых материалов. В связи с вариабельностью свойств углей (даже в пределах одного месторождения) выбор оптимальных условий для брикетирования представляет собой в большинстве случаев задачу эмпирического подбора. Ухудшение качества ископаемых топлив ведет к необходимости вовлекать сырье, которое обычно не используется для брикетирования. Например, разрабатываются методы получения углеродистых материалов из растительного сырья [1], неспекающихся и бурых углей [2].

Благодаря термической обработке, угольные брикеты имеют лучшие экологические характеристики и большую теплоту сгорания, чем рядовой уголь. В работе [3] показано, что при пиролизе углей удастся снизить содержание соединений серы. Эти свойства позволяют использовать брикеты, например, для сжигания в автоматических малых котельных, что позволяет существенно снизить удельный расход топлива и вредные выбросы.

Основным инструментом управления процессом пиролиза является температурный режим [4]. Даже для углей, слабоспекающихся при низких скоростях нагрева, можно подобрать условия (тепловой удар, давление, размеры частиц), при которых удастся получить достаточно качественный

полукокс [5]. Как отмечалось выше, такой подбор проводится, как правило, эмпирически [6]. Температура достижения пластического состояния для углей чаще всего находится в диапазоне 350–550 °C [7], но при медленном нагреве вторичные реакции (сшивание ароматических структур [8], взаимодействие с летучими компонентами [9], образование новых фаз [10]) приводят к ухудшению качества углеродного материала. Управляемый нагрев позволяет разделить временные масштабы тепловых процессов и химических превращений для управления процессом полукоксования. Для этого могут быть использованы как транспортные реакторы для дисперсных потоков, так и другие способы управления тепловыми процессами (к примеру, высокочастотный нагрев [11]).

Определение оптимальных условий брикетирования требует разработки количественного критерия, отвечающего нужному качеству брикета. Можно сформулировать ряд требований к этому критерию, например, прямая его зависимость от свойств заправки и возможность управления им с помощью внешних параметров.

Для получения полной информации о протекающих при полукоксовании процессах необходимо вести всесторонние измерения температур и концентраций по всему объему образца. Это не всегда возможно, в том числе из-за его неоднородности, как на масштабах слоя, так и для отдельных частиц. Естественные вариации состава и пористо-

сти угля приводят к необходимости использования методов усреднения как при анализе экспериментальных данных, так и при разработке физико-математических моделей. В связи с этим необходимо оценивать состояние засыпки таким образом, чтобы было возможным установление однозначной связи между этим состоянием и выбранным критерием. Одним из вариантов может быть построение математической модели засыпки, которая позволяет получить информацию о физико-химическом состоянии угольных частиц в ходе нагрева, чтобы, в свою очередь, связать эту информацию с критерием эффективности процесса термоподготовки и с управляющими параметрами. Гипотеза работы состоит в том, что качество брикета зависит от степени однородности термического превращения угля по толщине засыпки. Для проверки этой гипотезы строится такая математическая модель и проводится сравнение полученных на ее основе расчетов с экспериментальными данными.

В статье рассматривается процесс пиролиза засыпок слабоспекающегося угля в муфельной печи. В зависимости от времени выдержки и максимальной температуры нагрева глубина конверсии в засыпке меняется, что сказывается на механической прочности угольных брикетов. На основе сопоставления результатов экспериментальных исследований и численного моделирования нами предложен критерий неоднородности засыпки, который позволяет оценивать качество заготовки для брикетирования. Помимо этого, рассматривается энергетическая эффективность производства брикетов (по величине удельной теплоты, затрачиваемой на нагрев засыпки). На основе этих данных производится комплексная оценка стадии

термоподготовки на примере черемховского угля.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В качестве топлива для исследования использован черемховский уголь. Влажность угля равна 10 %, выход летучих – 38,7 %, зольность – 30,2 %. Теплота сгорания, определенная в калориметрической бомбе, равна 19,2 МДж/кг. Частицы угля со средним размером 6 мм (насыпная плотность 759 кг/м³) засыпаются в форму для прессования (диаметр 54 мм) и помещаются в муфельную печь, где нагреваются до температуры 300–400 °С (температура стенок 500–600 °С). После выдержки до заданного времени пребывания форма извлекается из муфельной печи и прессуется под давлением 5 т (около 20 МПа). Масса засыпки для всех случаев составляет около 80 г (высота около 5 см), максимальная температура нагрева регулируется автоматом, который подстраивается под значения опущенной в засыпку термопары. В таблице ниже приведены основные характеристики экспериментальных режимов. Полученные брикеты показаны на рис. 1: с ростом температуры нагрева возрастает зернистость поверхности, образцы становятся все менее однородными. Прочность брикетов измерялась путем сбрасывания по методике, описанной в ГОСТ 21289-75⁶. Полученные при 300–350 °С брикеты имеют прочность около 95 %, в то время как при температурах выше 350 °С брикеты рассыпаются на стадии прессования. Для экспериментов использовалось оборудование Центра коллективного пользования «Высокотемпературный контур».

Для численных расчетов используется одномерная модель теплопереноса в виде (1):

Условия экспериментальных исследований
Conditions of experimental studies

Температура, °С	Время нагрева, мин	Относительная потеря массы, %
300	53	16,1
300	64	14,1
300	70	15,9
320	61	20,1
350	72	25,4
375	51	28,6
400	42	31,3

⁶ГОСТ 21289-75. Брикеты угольные. Методы физических испытания. Введ. 01.07.77. (с изм. в мае 1978 г., в июле 1984 г.). М.: Изд-во стандартов, 1986.

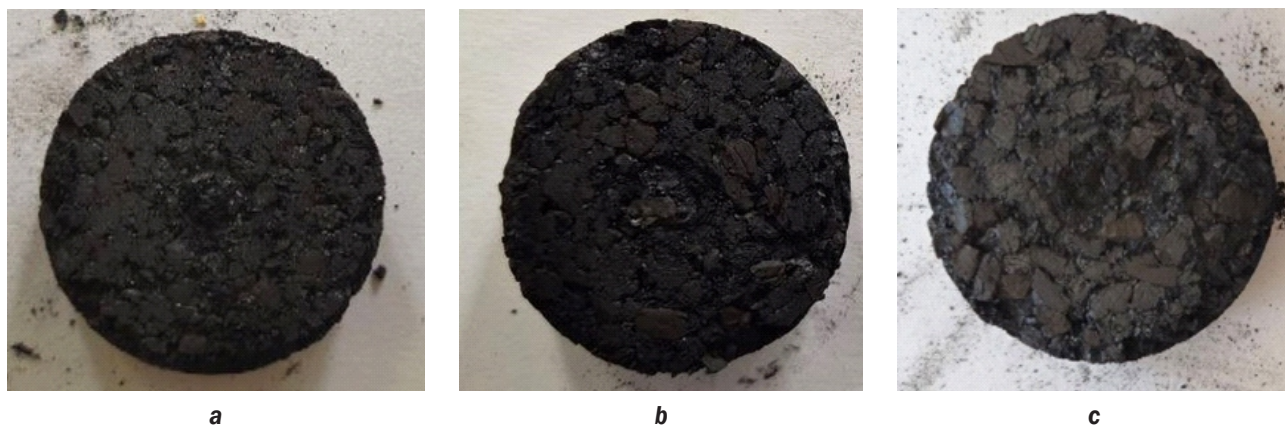


Рис. 1. Внешний вид угольных брикетов, полученных при разных максимальных температурах нагрева: а – 300°C; б – 320°C; в – 350°C

Fig. 1. Appearance of coal briquettes obtained at different maximum heating temperatures: a – 300°C; b – 320°C; c – 350°C

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + q, \quad (1)$$

где T – температура, К; t – время, с; x – координата (высота слоя), м; c – удельная изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность засыпки, кг/м³; λ – эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); q – тепловой эффект, который определяется испарением воды и протеканием эндотермической реакции (термического разложения угля), Дж/м³. На внешней границе слоя частиц происходит конвективный и лучистый теплообмен с окружающей средой (заполняющий муфель воздух, стенки печи). Теплофизические свойства угля рассчитывались по рекомендациям работ [12, 13]. Лучистая поправка к коэффициенту теплопроводности вносилась согласно работе [14]. Сушка моделируется ступенчатым фазовым переходом при температуре 100°C. Температурная неоднородность отдельных частиц не учитывается (время тепловой релаксации частицы намного меньше прогрева слоя).

Для описания термического разложения используется двухстадийная схема [15–17]: $C \Rightarrow M (+G) \Rightarrow R (+G)$, где C – исходный уголь; M – промежуточный продукт; уголь в размягченном состоянии (метапласт); G – газообразные продукты разложения; R – твердый остаток (полукок). Кинетические коэффициенты для обеих брутто-реакций взяты из работы [17]. Высокая массовая доля и равномерное распределение промежуточного продукта перед прессованием делают брикет более механически прочным. Отметим, что одновременное выполнение этих

требований не всегда возможно: для достижения высокой доли промежуточного продукта нужны малые времена пребывания засыпки в печи при высокой температуре; для равномерности распределения размягченной угольной массы – большие времена пребывания при низких температурах.

Совместное решение уравнения теплопроводности с химическими реакциями проводится численно с помощью расщепления по физическим процессам. Для решения уравнений переноса используется метод прогонки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Расчетные распределения температуры и доли угля в пластическом состоянии показаны на рис. 2. С ростом температуры нагрева засыпка прогревается до большей степени разложения, при этом промежуточный продукт распределен менее однородно по высоте засыпки. Естественно, что последующее прессование приводит к образованию менее прочных брикетов. С другой стороны, низкотемпературный пиролиз требует большего времени, при этом отношение скоростей рассматриваемых последовательных реакций изменяется таким образом, что вторая стадия становится преобладающей. В связи с этим появляется вопрос о выборе оптимальной программы для термоподготовки угольной засыпки перед прессованием.

С помощью модели были проведены расчеты процесса пиролиза угольной засыпки (массой 80 г, с теми же геометрическими размерами) при разных максимальных температурах и при разной продолжительности

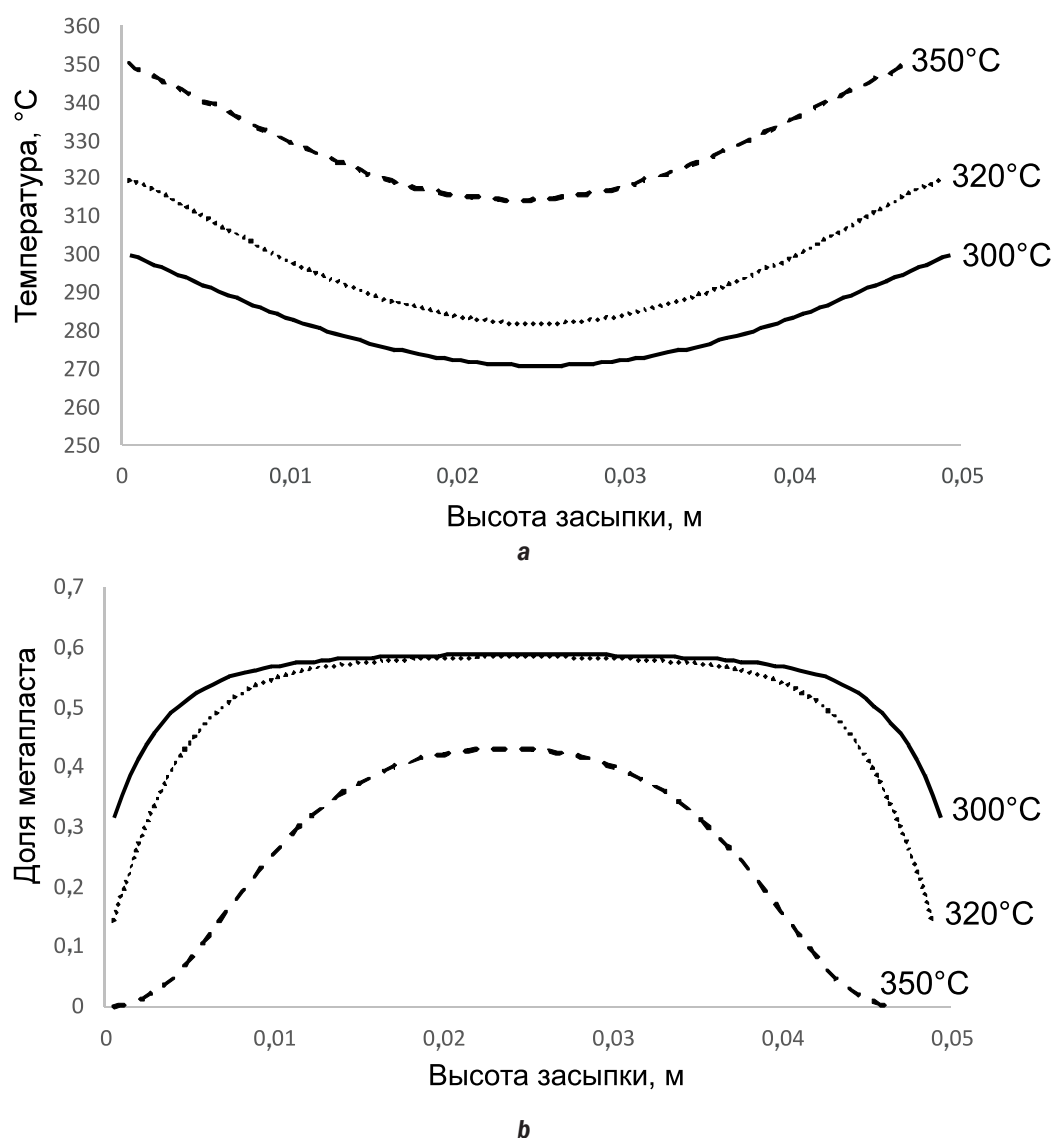


Рис. 2. Расчетные профили температуры (а) и массовой доли промежуточного продукта (b) на момент окончания нагрева при разных максимальных температурах

Fig. 2. Calculated profiles of temperature (a) and mass fraction (b) of the intermediate product at the end of heating at different maximum temperatures

нагрева. Для упрощения предполагаем, что температура газа в муфельной печи линейно растет со временем (10 К/мин) до максимальной температуры, после чего остается постоянной. С ростом максимальной температуры глубина протекания реакций разложения органической массы ожидаемо возрастает. Расчеты показывают, что при длительности нагрева до 2000 с доля промежуточного продукта растет, затем начинается ее резкое снижение, особенно при высоких температурах. Перепад температур по слою не является существенным критерием однородности конверсии угля, более того, существуют временные интервалы с малоизменяющимся высоким градиентом темпера-

туры, они соответствуют стадии сушки [18]. Стадия сушки существенно перекрывается с разложением органической массы угля. В настоящей модели не учитываются возможные перекрестные эффекты (например, влияние водяного пара на динамику выделения и состав продуктов), поэтому влияние сушки сводится к тепловому взаимодействию фазового перехода с процессами теплопереноса.

Для оценки неоднородности распределения размягченной угольной массы по высоте засыпки можно предложить критерий – разность между максимальной и минимальной долей промежуточного продукта, отнесенная к среднему значению (коэффициент осцилляции $F(t)$) (2):

$$F(t) = \frac{\max_x M(t, x) - \min_x M(t, x)}{\langle M(t, x) \rangle} \quad (2)$$

Другими показателями могут выступать средняя массовая доля промежуточного компонента, а также ее произведение с критерием $F(t)$. На рис. 3 показаны результаты расчетов с отмеченными на них маркерами экспериментальными режимами. Круглые маркеры показывают условия, при которых получены прочные брикеты, треугольные – условия для хрупких брикетов. Можно видеть, что диапазоны условий различаются в первую очередь по температуре. Подходящие условия для брикетирования лежат в области низких температур нагрева и времени нагрева 3000–4000 с. В этой области критерий $F(t)$ достигает минимальных значений (0,5–1), а доля промежуточного продукта максимальна (около 0,7). Увеличение температуры термообработки ведет к росту неоднородности и, как следствие, к худшим свойствам брикетов.

Произведение критерия $F(t)$ и среднего содержания компонента M – это комбинированный критерий, который показывает одновременно вклад однородности и насыщенности угольной массы размягченным промежуточным продуктом пиролиза. Однако, как показывает рис. 3, этот критерий не дает четких различий между режимами термopодготовки.

Диапазон экспериментальных температур оказывается довольно узким, в то время как расчеты показывают, что высокая

однородность достигается при невысоких температурах нагрева (для заданного размера заготовки). При этом, однако, пиролиз замедляется. Интенсификация процесса возможна, например, за счет уменьшения порций угля, подвергаемых нагреву. Таким образом, предложенная численная модель позволяет качественно оценивать влияние условий термopодготовки на качество угольных брикетов.

Кроме состояния угля можно также оценивать тепловые затраты на термopодготовку: их снижение поможет улучшить технико-экономические и экологические показатели установок для получения термобрикетов, поскольку нагрев требует дополнительного расхода топлива. На рис. 4 показано изменение энергетических затрат (МДж/кг сырого угля), рассчитанных как интеграл от теплового потока на границе между угольной засыпкой и греющей средой: интенсификация теплообмена позволяет уменьшить удельные затраты теплоты, поэтому снижение температуры и увеличение времени пребывания засыпки в печи приводят к затратам в 2–3 МДж/кг при производстве прочных брикетов (режимы с низкой прочностью брикетов требуют 1–2,5 МДж/кг).

Высокая скорость нагрева влечет за собой малые времена нагрева (и, соответственно, меньше затраты теплоты), однако при этом возрастает неоднородность конверсии угля. При малых скоростях нагрева брикет более однороден, но требует больших времен обработки (и больших затрат теплоты).

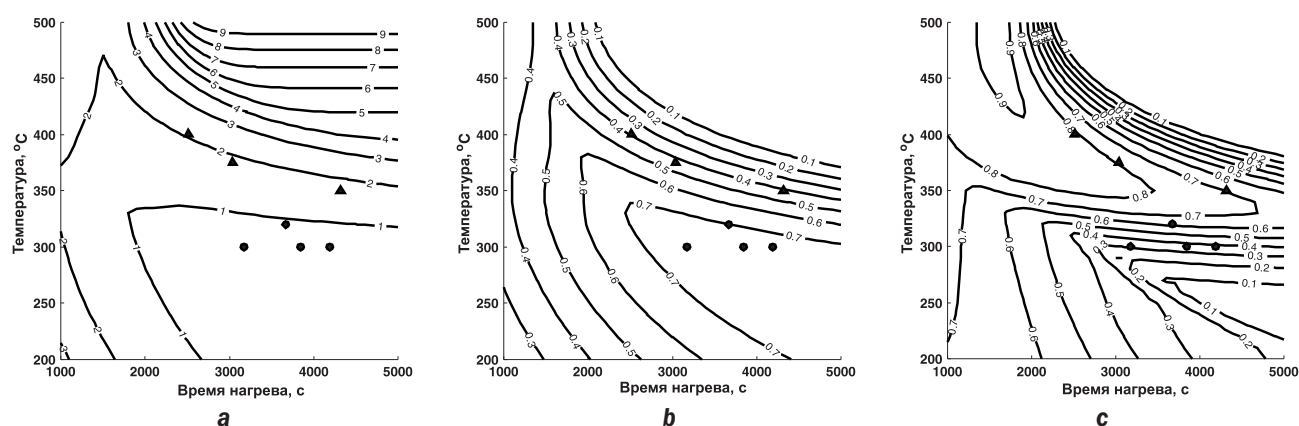


Рис. 3. Сравнение критериев для оценки прочности брикетов: а – критерий неоднородности; б – доля угля в размягченном состоянии; в – произведение двух первых критериев

Fig. 3. Comparison of criteria for assessing briquette strength: а – heterogeneity criterion; б – proportion of coal in a softened state; в – product of the first two criteria

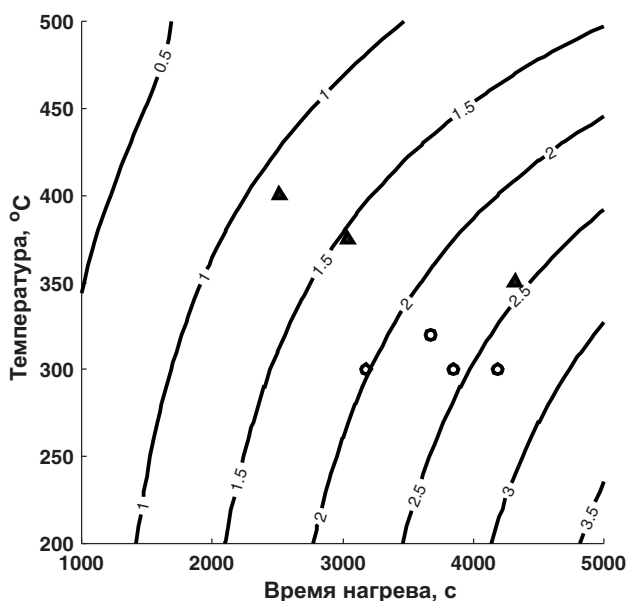


Рис. 4. Удельные затраты теплоты на полукоксувание угля, МДж/кг (числа на линиях)

Fig. 4. Specific heat consumption for coal semi-coking, MJ/kg (numbers on lines)

Проведенные расчеты показывают, что тепловые затраты в рассмотренном диапазоне условий меняются в несколько раз, поэтому имеется существенный потенциал для их снижения.

Расчетные тепловые затраты при брикетировании составляют 10–15 % от теплотворной способности топлива. Часть этих затрат можно возместить за счет сжигания пиролизного газа, однако нестабильность

его состава и загрязненность смолой способны приводить к необходимости сжигания сырого угля или полученных брикетов. При этом, однако, появляется возможность регенерации теплоты (например, в процессе сушки). Выбор дополнительного топлива должен производиться с учетом более детального моделирования установки для брикетирования, которое может стать дальнейшим развитием настоящего исследования. Другие возможные способы термоподготовки могут включать обработку реагентами (например, диоксидом углерода [19]), микроволновой нагрев [20] и т.д.): для таких процессов предложенные оценки непригодны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведены экспериментальные исследования процесса термоподготовки угольных засыпок перед брикетированием, получены механически прочные брикеты из слабоспекающегося черемховского угля. На основе численной модели предложен способ оценки качества брикетов по максимальной температуре и продолжительности нагрева засыпки. Расчеты показывают, что значения температур, соответствующих наилучшей прочности брикетов, ограничиваются областью 300–320 °C при времени нагрева около 1 ч. Тепловые затраты на производство брикетов составляют 2–3 МДж/кг угля.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Florentino-Madiedo L., Díaz-Faes E., Barriocanal C. Reactivity of biomass containing briquettes for metallurgical coke production // *Fuel Processing Technology*. 2019. Vol. 193. P. 212–220. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.05.017>. EDN: SOGQLT.
2. Katalambula H., Gupta R. Low-grade coals: a review of some prospective upgrading technologies // *Energy Fuels*. 2009. Vol. 23. Iss. 7. P. 3392–3405. <https://doi.org/10.1021/ef801140t>.
3. Maysyuk E.P., Kozlov A.N. Technology of thermal preparation of coal for ecologically pure combustion of fuel in small boilers // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1565. P. 012059. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1565/1/012059>. EDN: UKOJZD.
4. Vega M.F., Díaz-Faes E., Barriocanal C. Influence of the heating rate on the quality of metallurgical coke // *ACS Omega*. 2021. Vol. 6. Iss. 50. P. 34615–34623. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05007>. EDN: IQJJSX.
5. Перепелица А.Л. Пирогенетическое окускование углей Иркутского бассейна. М.: Академия наук СССР, 1963. 220 с.
6. Nyathi M.S., Kruse R., Mastalerz M., Bish D.L. Nature and origin of coke quality variation in heat-recovery coke making technology // *Fuel*. 2016. Vol. 176. P. 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.02.050>.
7. Chen Y., Lee S., Tahmasebi A., Mahoney M., Yu J., Bai J. A review of the state-of-the-art research on carbon structure evolution during the coking process: from plastic layer chemistry to 3D carbon structure establishment // *Fuel*. 2020. Vol. 271. P. 117657. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117657>. EDN: AJHWGY.
8. Xu Liang, Liu Haiyu, Jin Yan, Fan Baoguo, Qiao Xiaolei, Jing Bo. Structural order and dielectric properties of coal chars // *Fuel*. 2014. Vol. 137. P. 164–171. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.08.002>.
9. Liu Zhenyu, Guo Xiaojin, Shi Lei, He Wenjing, Wu Junfei, Liu Qingya, et al. Reaction of volatiles - a crucial step in pyrolysis of coals // *Fuel*. 2015. Vol. 154. P. 361–369. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.04.006>.

10. Yu Jianglong, Lucas J.A., Wall T.F. Formation of the structure of chars during devolatilization of pulverized coal and its thermoproperties: a review // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2007. Vol. 33. P. 135–170. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.07.003>.
11. Lin Baiquan, Li He, Chen Zhongwei, Zheng Chunshan, Hong Yidu, Wang Zheng. Sensitivity analysis on the microwave heating of coal: a coupled electromagnetic and heat transfer model // *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 126. P. 949–962. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.012>.
12. Агроскин А.А. Тепловые и электрические свойства углей. М.: Металлургиздат, 1959. 268 с.
13. Shi Q., Qin Y., Chen Y. Relationship between thermal conductivity and chemical structures of Chinese coals // *ACS Omega*. 2020. Vol. 5. Iss. 29. P. 18424–18431. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02281>. EDN: UORRXP.
14. Ковенский В.И., Теплицкий Ю.С. О теплопроводности зернистого слоя // *Инженерно-физический журнал*. 2008. Т. 81. № 5. С. 956–962. EDN: NDLODZ.
15. Oh M.S., Peters W.A., Howard J.B. An experimental and modeling study of softening coal pyrolysis // *AIChE Journal*. 1989. Vol. 35. Iss. 5. P. 775–792. <https://doi.org/10.1002/aic.690350509>.
16. Matsuoka K., Hayashi J., Chiba T. A Model for softening and resolidification of coals heated at different rates // *ISIJ International*. 1997. Vol. 37. Iss. 6. P. 566–572. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.37.566>.
17. Sciazko M., Mertas B., Stepień L. Kinetic modelling of coking coal fluidity development // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020. Vol. 142. Iss. 2. P. 977–990. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09487-0>. EDN: NWZGNF.
18. Atkinson B., Merrick D. Mathematical models of the thermal decomposition of coal. 4. Heat transfer and temperature profiles in coke-oven charge // *Fuel*. 1983. Vol. 62. P. 553–561. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(83\)90225-9](https://doi.org/10.1016/0016-2361(83)90225-9).
19. Apicella B., Russo C., Cerciello F., Stanzione F., Ciajolo A., Scherer V., et al. Insights on the role of primary and secondary tar reactions in soot inception during fast pyrolysis of coal // *Fuel*. 2020. Vol. 275. P. 117957. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117957>.
20. Ellison C., Abdelsayed V., Smith M., Shekhawat D. Comparative evaluation of microwave and conventional gasification of different coal types: experimental reaction studies // *Fuel*. 2022. Vol. 321. P. 124055. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124055>.

References

1. Florentino-Madiedo L., Díaz-Faes E., Barriocanal C. Reactivity of biomass containing briquettes for metallurgical coke production. *Fuel Processing Technology*. 2019;193:212-220. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.05.017>. EDN: SOGQLT.
2. Katalambula H., Gupta R. Low-grade coals: a review of some prospective upgrading technologies. *Energy Fuels*. 2009;23(7):3392-3405. <https://doi.org/10.1021/ef801140t>.
3. Maysyuk E.P., Kozlov A.N. Technology of thermal preparation of coal for ecologically pure combustion of fuel in small boilers. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1565:012059. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1565/1/012059>. EDN: UKOJZD.
4. Vega M.F., Díaz-Faes E., Barriocanal C. Influence of the heating rate on the quality of metallurgical coke. *ACS Omega*. 2021;6(50):34615-34623. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05007>. EDN: IQJJSX.
5. Perepelitsa A.L. *Pyrogenetic agglomeration of coals of the Irkutsk basin*. Moscow: USSR Academy of Sciences; 1963, 220 p. (In Russ.).
6. Nyathi M.S., Kruse R., Mastalerz M., Bish D.L. Nature and origin of coke quality variation in heat-recovery coke making technology. *Fuel*. 2016;176:11-19. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.02.050>.
7. Chen Y., Lee S., Tahmasebi A., Mahoney M., Yu J., Bai J. A review of the state-of-the-art research on carbon structure evolution during the coking process: from plastic layer chemistry to 3D carbon structure establishment. *Fuel*. 2020;271:117657. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117657>. EDN: AJHWGY.
8. Xu Liang, Liu Haiyu, Jin Yan, Fan Baoguo, Qiao Xiaolei, Jing Bo. Structural order and dielectric properties of coal chars. *Fuel*. 2014;137:164-171. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.08.002>.
9. Liu Zhenyu, Guo Xiaojin, Shi Lei, He Wenjing, Wu Junfei, Liu Qingya, et al. Reaction of volatiles - a crucial step in pyrolysis of coals. *Fuel*. 2015;154:361-369. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.04.006>.
10. Yu Jianglong, Lucas J.A., Wall T.F. Formation of the structure of chars during devolatilization of pulverized coal and its thermoproperties: a review. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2007;33:135-170. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.07.003>.
11. Lin Baiquan, Li He, Chen Zhongwei, Zheng Chunshan, Hong Yidu, Wang Zheng. Sensitivity analysis on the microwave heating of coal: a coupled electromagnetic and heat transfer model. *Applied Thermal Engineering*. 2017;126:949-962. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.012>.
12. Агроскин А.А. *Thermal and electrical properties of coals*. Moscow: Metallurgizdat; 1959, 268 p. (In Russ.).
13. Shi Q., Qin Y., Chen Y. Relationship between thermal conductivity and chemical structures of Chinese coals. *ACS Omega*. 2020;5(29):18424-18431. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02281>. EDN: UORRXP.
14. Ковенский В.И., Теплицкий Ю.С. On the thermal conductivity of a blown granular bed. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2008;81(5):956-962. (In Russ.). EDN: NDLODZ.

15. Oh M.S., Peters W.A., Howard J.B. An experimental and modeling study of softening coal pyrolysis. *AIChE Journal*. 1989;35(5):775-792. <https://doi.org/10.1002/aic.690350509>.
16. Matsuoka K., Hayashi J., Chiba T. A Model for softening and resolidification of coals heated at different rates. *ISIJ International*. 1997;37(6):566-572. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.37.566>.
17. Sciazko M., Mertas B., Stepień L. Kinetic modelling of coking coal fluidity development. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020;142(2):977-990. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09487-0>. EDN: NWZGNF.
18. Atkinson B., Merrick D. Mathematical models of the thermal decomposition of coal. 4. Heat transfer and temperature profiles in coke-oven charge. *Fuel*. 1983;62:553-561. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(83\)90225-9](https://doi.org/10.1016/0016-2361(83)90225-9).
19. Apicella B., Russo C., Cerciello F., Stanzione F., Ciajolo A., Scherer V., et al. Insights on the role of primary and secondary tar reactions in soot inception during fast pyrolysis of coal. *Fuel*. 2020;275:117957. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117957>.
20. Ellison C., Abdelsayed V., Smith M., Shekhawat D. Comparative evaluation of microwave and conventional gasification of different coal types: experimental reaction studies. *Fuel*. 2022;321:124055. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124055>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Галеев Владислав Гаярович,
аспирант,
инженер лаборатории термодинамики,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, Российская Федерация,
г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130
vlad-galeev-2002@mail.ru

Донской Игорь Геннадьевич,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
заведующий отделом теплосиловых систем,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, Российская Федерация,
г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130
donskoy.chem@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2309-8461>

Козлов Александр Николаевич,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
заведующий лабораторией термодинамики,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, Российская Федерация,
г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130
kozlov@isem.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5983-5884>

Пензик Максим Владиславович,
кандидат химических наук,
старший научный сотрудник
лаборатории термодинамики,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, Российская Федерация,
г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130
maxim.penzik@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3544-9866>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladislav G. Galeev,
Postgraduate Student,
Thermodynamics Laboratory Engineer,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033,
Russian Federation
vlad-galeev-2002@mail.ru

Igor G. Donskoy,
Dr. Sci. (Eng.),
Chief Researcher, Head of the Thermal
Power Systems Department,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033,
Russian Federation
donskoy.chem@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2309-8461>

Aleksandr N. Kozlov,
Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher,
Head of the Thermodynamics Laboratory,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033,
Russian Federation
kozlov@isem.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5983-5884>

Maksim V. Penzik,
Cand. Sci. (Chem.),
Senior Researcher of the Thermodynamics Laboratory,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033,
Russian Federation
maxim.penzik@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3544-9866>

Иса Юсуф Макарфи,
PhD,
профессор факультета химической
технологии и металлургии,
Университет Витватерсранда,
2000, Южная Африка, г. Йоханнесбург,
Авеню Яна Смэтса, 1, Браамфонтейн
yusuf.isa@wits.ac.za
<https://orcid.org/0000-0001-8272-3402>

Yusuf M. Isa,
PhD,
Professor of the School of Chemical
and Metallurgical Engineering,
University of the Witwatersrand,
Johannesburg, South Africa
1 Jan Smuts Avenue, Braamfontein 2000
yusuf.isa@wits.ac.za
<https://orcid.org/0000-0001-8272-3402>

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Донской Игорь Геннадьевич с 2026 года является членом редакционной коллегии журнала «iPolytech Journal», но не имеет отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах авторы не заявляли.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 18.12.2025 г.; одобрена после рецензирования 10.02.2026 г.; принята к публикации 16.02.2026 г.

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

Igor G. Donskoy has been a member of the iPolytech Journal Editorial Board since 2026, but he was not involved in making decision about accepting the present article for publication. The article was subjected the Journal's review procedure. The authors do not report any other conflicts of interest

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 18.12.2025; approved after reviewing 10.02.2026; accepted for publication 16.02.2026.