

МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья

УДК 66.041:66.047.5:53.043

EDN: ZLHKZZ

DOI: 10.21285/1814-3520-2025-4-580-592



Теплофизические особенности брикетов, предназначенных для использования в качестве искусственной донной постели при производстве окатышей

А.В. Ишимбаев¹, И.С. Берсенев², А.И. Груздев³, Н.А. Спирин⁴,
В.И. Матюхин⁵, Б.О. Торобеков⁶, И.А. Мотыгулин⁷

^{1,2,4,5}Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия
^{1-3,6,7}ООО «НПВП Торэкс», Екатеринбург, Россия

Резюме. Цель – исследовать теплофизические свойства брикетов как альтернативы обожженным железорудным окатышам для формирования искусственной донной постели на конвейерных обжиговых машинах. Методология включала физическое моделирование сушки (продувка теплоносителем 150/300 °С), дилатометрический анализ, измерение температурных профилей в брикетах, а также математическое моделирование в ПО TOREX Sensible Indurating Machine. Брикеты изготавливались из концентрата окисленных железистых кварцитов с органическими и неорганическими связующими (цемент, бентонит) при давлении 15 т (цилиндры Ø35×35 мм). Установлено, что переувлажнение при сушке не снижает прочность брикетов (70,1 даН/брикет) благодаря низкой пористости (10% против 30% у окатышей), ограничивающей водопоглощение. Показано, что сушка брикетов протекает на 30–40% медленнее, что обусловлено уменьшенной удельной поверхностью и сниженной проницаемостью по сравнению с железорудными окатышами и требует корректировки режимов нагрева. Коэффициент теплопроводности составил 0,12 Вт/(м·К). Показано, что при обжиге спекание происходит исключительно в поверхностных слоях (глубина 2-3 мм), так как внутренние зоны не достигают температурного порога спекания (>1000 °С) из-за низкой теплопроводности материала. Целостность брикета обеспечивается прочностью обожженной корки и термостойкостью связующего в ядре. Математическое моделирование для конвейерной обжиговой машины № 3 АО «Михайловский горно-обогатительный комбинат» показало, что замена стандартной постели, представляющей собой обожженные окатыши с температурой 80 °С, на брикеты с температурой 15 °С увеличивает производительность данной машины на 25% (до 583 даН/окатыш) и снижает удельный расход природного газа при обжиге окатышей на 8,3% (до 8,8 м³/т) при сохранении качества основной продукции – показателя прочности. Полученные результаты подтверждают принципиальную возможность промышленного применения брикетов всех испытанных составов в качестве искусственной донной постели конвейерной обжиговой машины, демонстрируя их ключевое теплофизическое преимущество – снижение теплопотерь в зоне колосников.

Ключевые слова: брикеты, донная постель, обжиг окатышей, теплопроводность, сушка, математическое моделирование, теплоперенос, нагрев

Благодарность. Выражаем благодарность за консультативное участие в выборе рецептуры брикетов Е.Р. Сабирову и А.М. Бижанову.

Для цитирования: Ишимбаев А.В., Берсенев И.С., Груздев А.И., Спирин Н.А., Матюхин В.И., Торобеков Б.О., Мотыгулин И.А. Теплофизические особенности брикетов, предназначенных для использования в качестве искусственной донной постели при производстве окатышей // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 4. С. 580–592. EDN: ZLHKZZ. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-4-580-592>. EDN: ZLHKZZ.

Thermophysical properties of briquettes intended for use as an artificial bottom bed in iron ore pelletizing

Aleksei V. Ishimbaev¹✉, Ivan S. Bersenev², Andrei I. Gruzdev³, Nikolai A. Spirin⁴,
Vladimir I. Matyukhin⁵, Bektur O. Torobekov⁶, Il'yas A. Motygulin⁷

^{1,2,4,5}Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia
^{1-3,6,7}Torex Research and Development Company, Yekaterinburg, Russia

Abstract. The study aimed to examine the thermophysical properties of briquettes as an alternative to indurated iron ore pellets in the formation of an artificial bottom bed in horizontal-grate machines. The methodology included physical simulation of the drying process (circulation of a heat transfer agent at 150/300°C), dilatometric analysis, measurement of temperature profiles in briquettes, and mathematical modeling with the use of TOREX Sensible Indurating Machine software. The briquettes were made from oxidized ferruginous quartzite concentrate with organic and inorganic binders (cement; bentonite) under a load of 15 t (cylinders measuring Ø35×35 mm). It was established that excessive moisture during drying does not reduce the strength of briquettes (70.1 daN/briquette) due to their low porosity (10% as compared to 30% in pellets) that limits water absorption. The drying of briquettes was shown to proceed 30–40% slower due to their reduced specific surface area and permeability compared to iron ore pellets, thus requiring adjustments to the heating conditions. The thermal conductivity coefficient amounted to 0.12 W/(m·K). During firing, sintering occurs exclusively in the surface layers (depth of 2–3 mm) since the inner zones do not reach the sintering temperature threshold (>1000°C) due to the low thermal conductivity of the material. The integrity of the briquette is ensured by the strength of the indurated surface and the thermal stability of the binder at its core. The mathematical simulation performed for the horizontal-grate machine No. 3 at the Mikhailovsky Mining and Processing Plant showed that the replacement of a standard bed comprising indurated iron ore pellets having a temperature of 80°C with briquettes having a temperature of 15°C increases the capacity of this machine by 25% (up to 583 daN/pellet) and reduces the specific consumption of natural gas during iron ore pellet firing by 8.3% (up to 8.8 m³/t) while maintaining the quality of the main product—the strength index. The obtained results confirm the feasibility of using briquettes of all tested compositions as an artificial bottom bed in horizontal-grate machines, demonstrating their key thermophysical advantage—heat loss reduction in the grate zone.

Keywords: briquettes, bottom bed, pellet firing, thermal conductivity, drying, mathematical simulation, heat transfer, heating

Acknowledgments. The authors thank E.R. Sabirov and A.M. Bizhanov for their advise in choosing the briquette recipe.

For citation: Ishimbaev A.V., Bersenev I.S., Gruzdev A.I., Spirin N.A., Matyukhin V.I., Torobekov B.O., Motygulin I.A. Thermophysical properties of briquettes intended for use as an artificial bottom bed in iron ore pelletizing. *iPolytech Journal*. 2025;29(4):580-592. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-4-580-592>. EDN: ZLHKZZ.

ВВЕДЕНИЕ

Производство стали в настоящее время обеспечивается сырьем за счет окускованных материалов (агломерат, окатыши, брикеты), формируемых из продуктов измельчения и обогащения руд⁸ [1]. Крупнейшие производители стали из Китая, Индии, России, стран Евросоюза и Японии на фоне стабилизации темпов потребления металла все более акцентируют свое развитие в направлении снижения выбросов и эмиссий [2–5]. Агломерат, наиболее распространенный вид окускованного железорудного сырья,

постепенно снижает свою долю в доменной шихте, а доля брикетов не превышает 5% от общего объема потребления. Вместе с тем производство железорудных окатышей при переработке железосодержащих руд и концентратов демонстрирует неуклонный рост, что связано с преимуществами окатышей перед агломератом и брикетами с точки зрения металлургических свойств и экологичности⁹ [6, 7]. Например, эмиссия пыли, СО и парниковых газов при производстве окатышей существенно ниже, чем при агломерации, а содержание железа – выше, чем в

⁸Берсенев И.С., Бардавелидзе Г.Г., Бижанов А.М., Брагин В.В., Груздев А.И., Евстюгин С.Н. Технология окускования железных руд и концентратов: учеб. пособ. М.: Металлургиздат, 2025. 406 с.

⁹World Steel in Figures 2024. Режим доступа: <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2024/> (дата обращения: 28.02.2025).

брокетах^{10,11} [8]. Такая тенденция повышения доли окатышей в структуре потребления металлургического сырья обуславливает требования к дальнейшей интенсификации производства.

В настоящий момент наиболее распространенной технологией производства окатышей являются их грануляция и обжиг на конвейерных обжиговых машинах [9]. Такая технология характеризуется высокой производительностью и умеренным расходом энергоресурсов, поскольку в ее основе лежит перекрестная схема движения газов при слоевом теплообмене¹² [10, 11]. Упрочнение окатышей до требуемого шахтными печами уровня (прочность на сжатие не менее 220..250 кг на окатыш [12–14]) достигается при температуре верха слоя не менее 1250 °С, а низа слоя – не менее 1200 °С. В таких условиях металлоконструкции обжиговых машин (тележки, колосники) имеют ограниченный ресурс, и для их защиты используется донная постель – слой уже обожженных окатышей. Донная постель играет роль инертного заполнителя, который аккумулирует тепло и обеспечивает ограничение температуры на поверхности колосников не более 1000 °С. Массовая доля донной постели составляет от 15 до 25% от массы обожженных окатышей. Если заменить этот обратный продукт на искусственную донную постель – брикеты, возможно существенно повысить производительность обжиговых машин – пропорционально массе донной постели. В работах [15, 16] предлагается использование вместо донной постели брикетов, упрочнение которых достигается при более низких значениях температуры в сравнении с окатышами. Такое решение позволяет повысить объем отгружаемой товарной продукции без повышения площади обжиговых машин – только за счет снижения циркуляционной нагрузки. Именно в этом состоит главная идея изложенного техноло-

гического решения. Подобная технология в настоящий момент находится в стадии разработки авторами, и для ее реализации требуется понимание теплофизических особенностей поведения брикетов в условиях термической обработки при обжиге на конвейерной машине. Цель исследования состоит в определении особенностей сушки и нагрева брикетов, а также оценке их влияния на технологические показатели обжиговой машины. Методами исследования были выбраны физическое и математическое моделирование процесса обжига железорудных окатышей, исходное сырье – брикеты из концентрата окисленных железистых кварцитов и связующего (неорганическое и органическое связующее – меласка¹³ [17]), полученные при давлении 15 т и имеющие форму цилиндра с высотой и диаметром 35 мм.

ИССЛЕДОВАНИЕ СУШКИ БРИКЕТОВ

Первой стадией процесса термической обработки брикетов служит их сушка. Следующий процесс сушки окатышей в настоящее время реализуется путем последовательного применения сушки продувом и прососом, когда газ движется снизу вверх и затем – сверху вниз. Особенностью такой организации процесса является переувлажнение сырья в слое за счет конденсации воды, а задача реверса теплоносителя состоит в уменьшении абсолютной величины переувлажнения. Моделирование процесса термической обработки осуществлялось в двух режимах (рис. 1): режим 1 – постепенное повышение температуры без влияния переувлажнения, режим 2 – с учетом переувлажнения. Переувлажнение моделировали путем опрыскивания брикетов водой и выдержки в течение 2 мин. В качестве функции отклика была выбрана прочность брикетов на сжатие: необходимое условие – сохранение прочности на уровне не менее 1,1 кг/окатыш (1,1 даН).

¹⁰ИТС 26-2023. Информационно-технические справочники. Режим доступа: <https://burondt.ru/itc> (дата обращения: 28.02.2025).

¹¹ИТС 25-2022. Информационно-технические справочники. Режим доступа: <https://burondt.ru/itc> (дата обращения: 28.02.2025).

¹²Ярошенко Ю.Г., Гордон Я.М., Ходоровская И.Ю. Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии черной металлургии: учеб. пособ. Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2012. 670 с.

¹³Бардавелидзе Г.Г. Научно обоснованные технические и технологические решения производства окатышей на обжиговых машинах из концентрата окисленных железистых кварцитов: дис. ... канд. техн. наук: 2.6.2. Екатеринбург, 2024. 144 с.

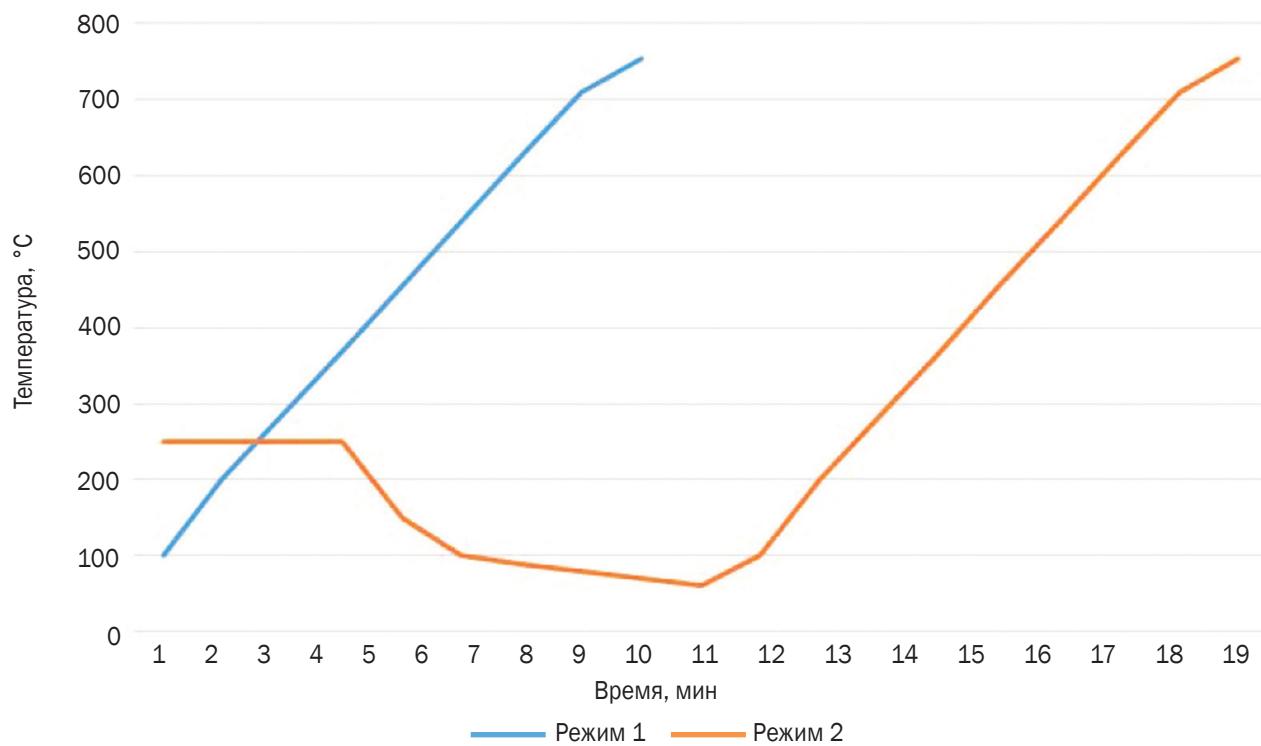


Рис. 1. Моделирование процесса термической обработки (режим 1 – постепенное повышение температуры без влияния переувлажнения, режим 2 – с учетом переувлажнения (с 1 по 4 мин – сушка; с 5 по 16 мин – опрыскивание водой, выдержка по 2 мин; с 17 по 25 мин – нагрев)

Fig. 1. Heat treatment process simulation (mode 1 – gradual temperature increase without the influence of overwetting, mode 2 – taking into account overwetting (from the 1st to 4th minutes – drying; from the 5th to 16th minutes – water spraying with 2 minute curing; from the 17th to 25th minutes – heating)

Результаты эксперимента свидетельствуют (табл. 1), что переувлажнение несущественно влияет на прочность брикетов в процессе сушки. Это, вероятно, связано с существенным различием окатышей и брикетов в значении пористости (30% и 10% соответственно): брикеты физически не могут впитать воду.

С практической точки зрения переувлажнение не является препятствием для использования брикетов в качестве донной постели. Однако такая особенность структуры может осложнить удаление воды при сушке. Для выяснения характеристик процесса сушки были выполнены эксперименты, в которых

проба окатышей или брикетов продувалась теплоносителем с заданной температурой и оценивалась изменением массы пробы. Температура теплоносителя была выбрана 150 °C и 300 °C, что соответствует реальным значениям этого параметра в зонах сушки 1 и 2 на действующих обжиговых машинах. Результаты исследования приведены в табл. 2. Из полученных данных следует, что сушка брикетов происходит медленнее, чем сырых окатышей. Несмотря на меньший общий объем влаги, подлежащей удалению, ее скорость испарения оказывается ниже, это связано с различием в структуре: брикеты имеют меньшую пористость и, как следствие,

Таблица 1. Результаты эксперимента
Table 1. Experiment results

Проба	Режим	Прочность на сжатие, даН/брicket
Концентрат (76,5%) + цемент (3%) + мелочь окатышей (13,5%) + бентонит (7%)	1	60,75
	2	70,10
Концентрат (83,3%) + известь (2%) + мелочь окатышей (14,7%) + органическое связующее (1%)	1	11,60
	2	12,28

сниженную проницаемость, что затрудняет диффузию паров влаги из внутренних областей. При этом следует учитывать, что физически брикеты содержат меньшую массовую долю воды в своей структуре. С технологической точки зрения такое различие показателей сушки приведет к снижению скорости нагрева слоя «постели» при термообработке, и это нужно учитывать при моделировании и реализации технологического процесса.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЖИГА БРИКЕТОВ

Поведение брикетов при высокотемпературной термической обработке исследовалось с использованием дилатометра (рис. 2). Были исследованы два варианта состава брикетов:

- а) на органическом связующем;
- б) бентонит + цемент.

Цель эксперимента состояла в том, чтобы выяснить качественные различия усадки проб в присутствии (рис. 2 а) органических составляющих, которые разлагаются при нагреве, и в отсутствии таких компонентов (рис. 2 б). Из полученных данных следует, что усадка, характеризующая начало спекания, начинается при температуре выше 1000 °С, при этом принципиальной разницы между связующими разного типа не отмечается.

Для оценки коэффициента теплопроводности был проведен эксперимент при следующих условиях. Были изготовлены брикеты и проведена их термическая обработка с нагревом до 1000 °С при скорости 50 °С/мин, выдержке при максимальной температуре 5 мин и затем охлаждение со скоростью 50 °С/мин. Такой режим в целом соответствует условиям донной постели. Для оценки коэффициента теплопроводности осуществляли контроль

Таблица 2. Показатели сушки брикетов и окатышей
Table 2. Drying performances of briquettes and pellets

Температура теплоносителя	мин	Убыль массы, %	
		брикеты	окатыши
150 °С	0	0	0
	5	0,4	1,1
	10	0,9	2,6
	15	1,5	4,2
	20	2,4	6,0
	25	3,0	7,1
	30	3,7	7,5
	35	4,4	7,6
	40	4,9	7,6
	45	5,3	7,6
	50	5,7	7,6
300 °С	0	0	0
	5	2	6,6
	10	5	7,8
	15	6	7,8
	20	6	7,8
	25	6	7,8
	30	6	7,9
	35	6	7,9
	40	6	7,9
	45	6	7,9
	50	6	7,9
	55	6	7,9

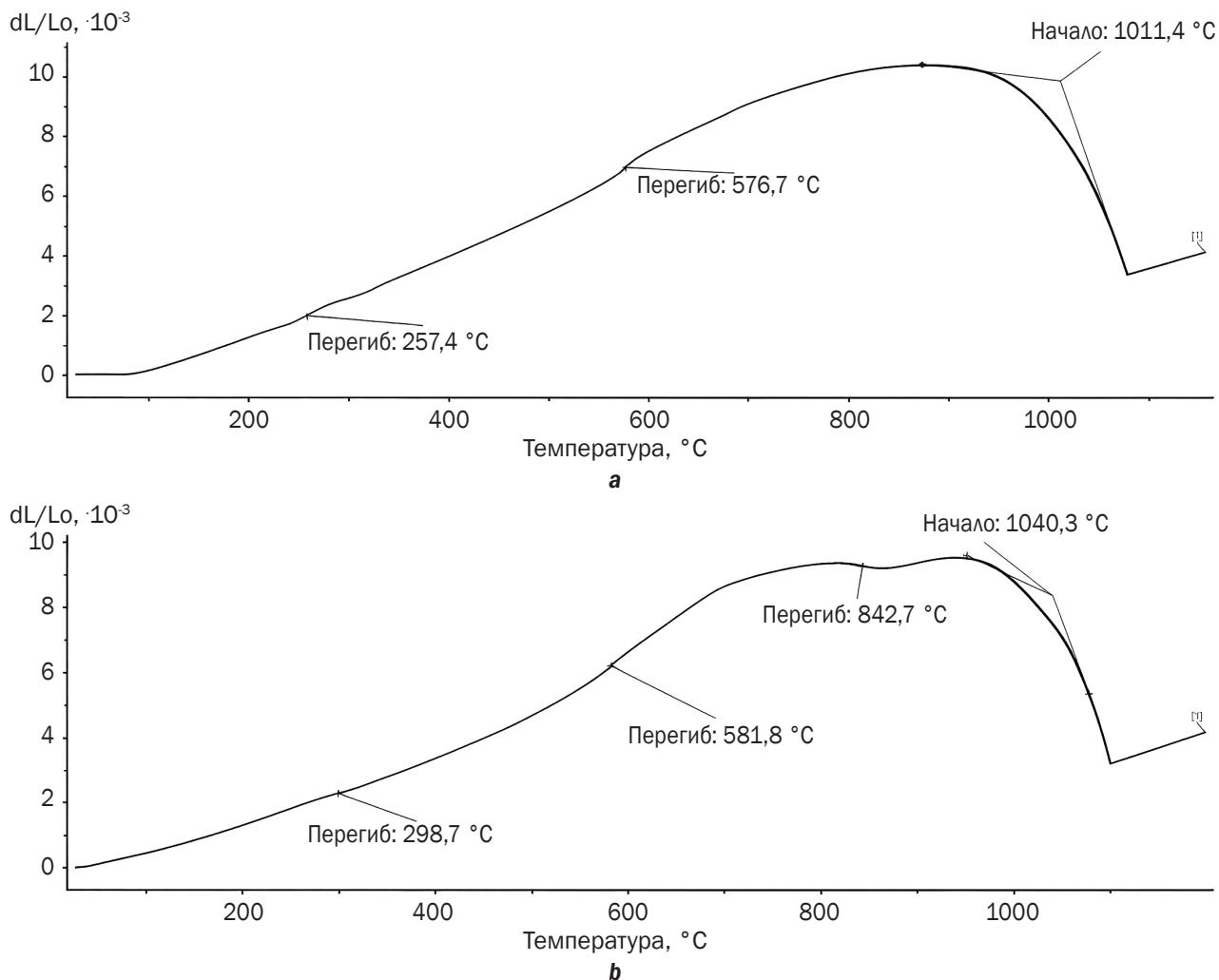


Рис. 2. Дилатограммы нагрева брикетов на: а – органическом связующем; б – связующем «бентонит-цемент»
 Fig. 2. Dilatograms of briquette heating using: a – organic binder; b – bentonite-cement binder

температуры снаружи брикетов и внутри. Измерения проводились термопарами градиуровки ХА (хромель-алюмель), один спай – снаружи образца, второй – замурован в центре брикета. Общий вид брикетов в корзинке для обжига и печи для обжига приведен на рис. 3, данные о прочности брикетов после обжига приведены в табл. 3. Видно, что прочность брикетов соответствует прочности окатышей низа слоя (не менее 150 даН/окатыш).

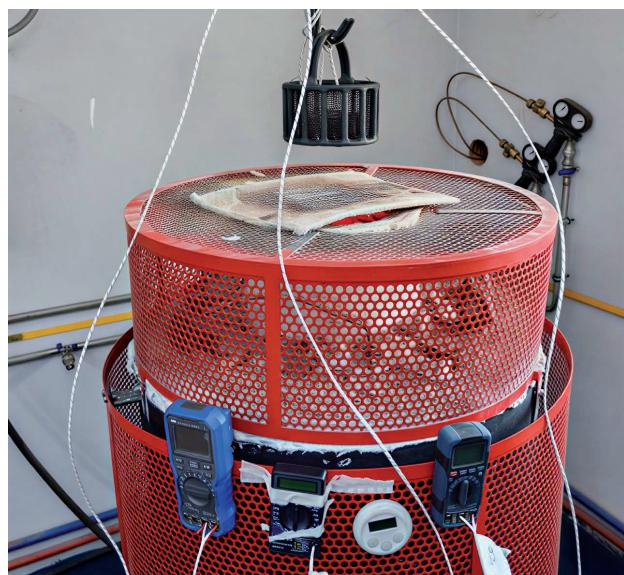
Определение на основании этих данных коэффициента теплопроводности было выполнено по аналогии с работой¹⁴. Значение коэффициента теплопроводности составило

0,12 Вт/(м·К) в области, в которой отсутствуют фазовые переходы. Данные об изменении температуры внутри брикета дают информацию не только для оценки теплофизических свойств, но также и позволяют уточнить требования к связующим веществам. В частности, из сопоставления рис. 2 и рис. 4 видно, что внутри брикета при термообработке процессы спекания не реализуются: температура внутри брикета низкая. Соответственно, целостность брикета определяется прочностью его поверхностных (обожженных) слоев и остаточной прочностью связующего внутри брикета. С точки зрения технологии изготовления брикетов для донной постели это

¹⁴Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024663929, Российская Федерация. TOREX Sensible Indurating Machine / В.В. Брагин, С.И. Поколенко, А.Ю. Поколенко, А.И. Груздев, А.В. Ишимбаев, И.С. Берсенев; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственное внедренческое предприятие ТОРЭКС». Заявка № 2024662902, заявл. 07.06.2024; опубл. 14.06.2024.



a



b

Рис. 3. Общий вид брикетов в корзинке для обжига (а) и печи для обжига (б)
Fig. 3. General view of briquettes in a firing basket (a) and a firing kiln (b)

Таблица 3. Данные о прочности брикетов после обжига
Table 3. Data on briquette strength after firing

Наименование опыта/добавки	Сырые, даN/окатыш	Сухие, даN/окатыш	Обожженные, даN/окатыш
Проба 1: концентрат + жидкое стекло (2%)	40,78	142,25	410,83
Проба 2: концентрат + органическое связующее (0,4%) + бентонит (2%)	12,77	36,89	174,19

означает, что брикеты должны иметь связку, которая сохраняет прочность при нагреве. То есть брикеты изначально должны быть достаточно прочными, и при обжиге их связующее должно способствовать упрочнению при на-

греве выше 400–500 °С, а при нагреве – до уровня ниже этих значений – как минимум не разупрочняться. Иными словами, спекание во всю глубину брикета не происходит и это должно быть учтено при выборе связующего.

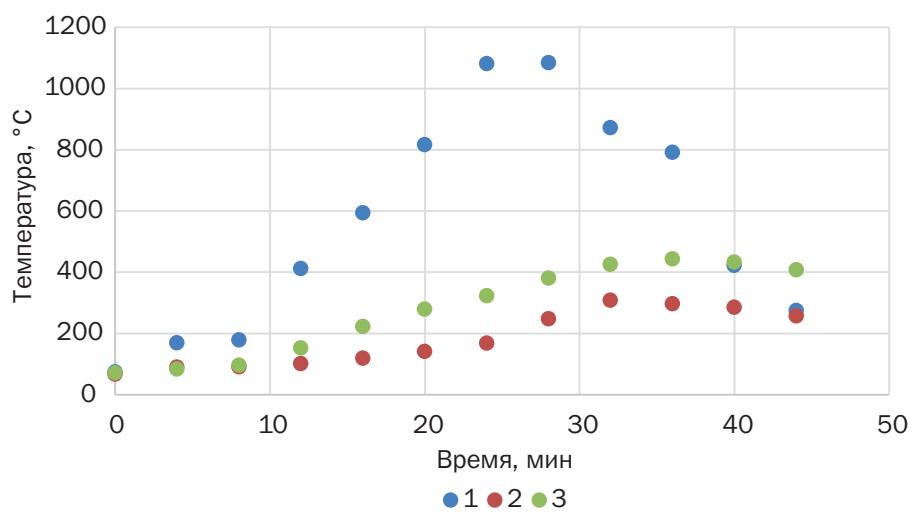


Рис. 4. Температура снаружи и внутри брикетов (1 – температура снаружи образца; 2 – температура внутри – проба 1; 3 – температура внутри – проба 2)

Fig. 4. Temperature outside and inside briquettes (1 – temperature outside the sample; 2 – inside temperature – sample 1; 3 – inside temperature – sample 2)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЖИГА

Моделирование процесса обжига осуществляли с использованием программного обеспечения TOREX Sensible Indurating Machine [18, 19], в котором осуществляется оценка обжига окатышей с учетом теплофизических свойств, физико-химических превращений и фазовых переходов, характерных для обжига железорудных окатышей. В качестве объекта-аналога была выбрана обжиговая машина № 3 АО «Михайловский горно-обогатительный комбинат им. А.В. Варичева», тепловая схема которой приведена на рис. 5 [20]. В процессе исследования оценены замена донной постели на брикеты и изменение температуры брикетов. Такой выбор переменных осуществлен потому, что

замена теплофизически инертной постели из обожженных окатышей на влажные брикеты приведет к изменению теплового баланса обжига, а кроме того – обожженные окатыши имеют температуру на уровне 80...100 °C, в то время как брикеты будут иметь температуру, близкую к внешней температуре цеха или склада. При моделировании режим термической обработки окатышей и их прочность сохранялись на заданном уровне. Результаты моделирования представлены в табл. 4. Брикеты считаются как слой постели, объем производства обожженных окатышей и содержание FeO в них возросли. Изменения процесса обжига при корректировке температуры донной постели незначительны, что, вероятно, обусловлено природой постели как оборотного продукта.

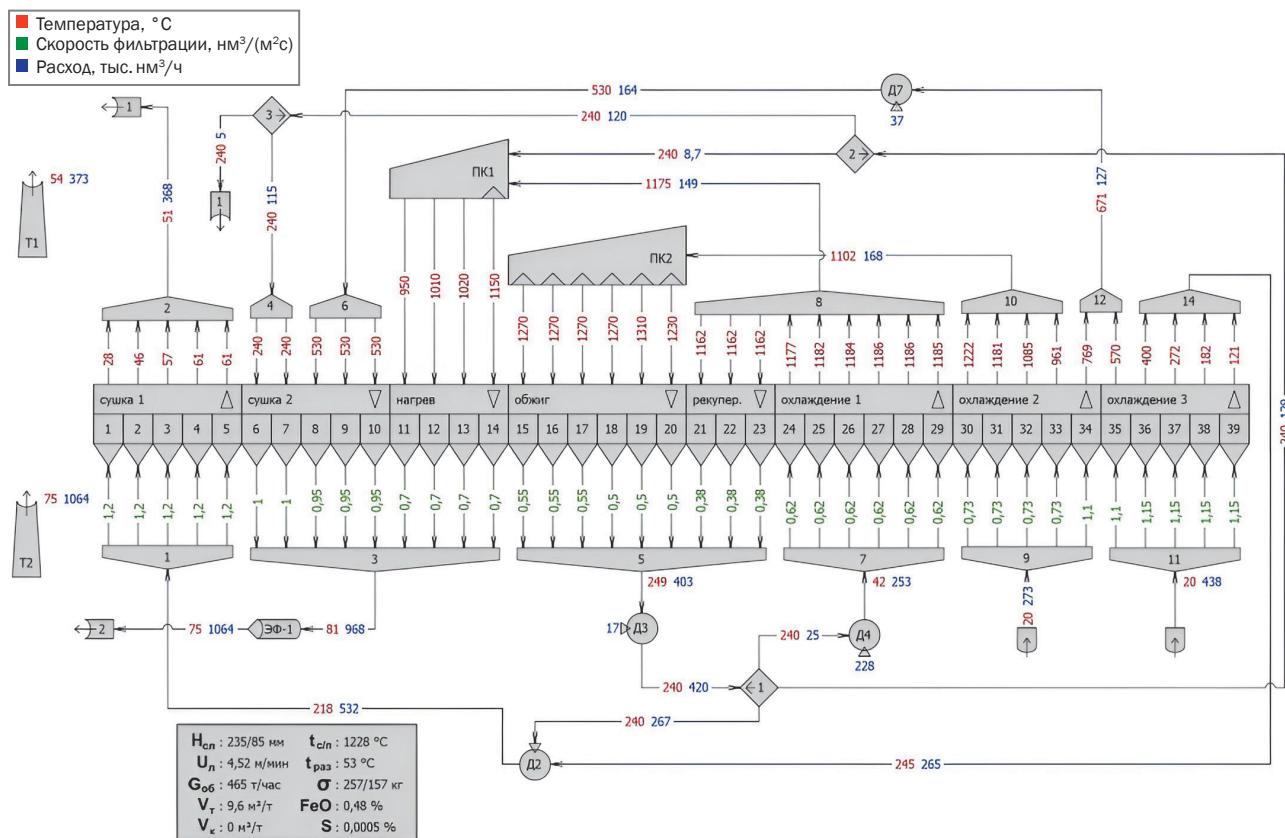


Рис. 5. Термовая схема конвейерной обжиговой машины (базовый вариант)
 Fig. 5. Thermal diagram of a conveyor firing machine (basic version)

Таблица 4. Результаты моделирования

Table 4. Simulation results

№	Вариант донной постели	Производительность средняя по слою, даН/окатыш	Содержание FeO в окатышах, %	Удельный расход природного газа, м³/т
1	Окатыши (80 °C)	465	0,48	9,6
2	Окатыши (15 °C)	465	0,48	9,6
3	Брикеты (15 °C)	583	3,71	8,8

На рис. 6 приведены термограммы процесса обжига в различных вариантах донной постели в разных участках печи. Видно, что использование брикетов приводит к незначительному ускорению нагрева слоя в зоне обжига, и при этом принципиальных отличий в режимах термической обработки нет.

Таким образом, результаты исследования показали принципиальную возможность использования брикетов в качестве искусственной донной постели для обжига железорудных окатышей на конвейерной обжиговой машине с позиции их теплофизических свойств. Полученные данные могут служить исходной информацией для:

- подбора оптимальных составов брикетов;
- разработки технических решений подачи их на обжиговую машину;
- технико-экономической оценки использования смеси окатышей и брикетов в металлургическом процессе.

Проработка этих задач планируется авторами в дальнейшем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сушка брикетов, предназначенных для использования в качестве искусственной дон-

ной постели, в условиях, характерных для обжиговой конвейерной машины (в том числе переувлажнение), не ухудшает их прочность. При этом удаление влаги из брикетов протекает медленнее, чем из окатышей. Это связано с различием в плотности и пористости кусков: окатыши имеют большую пористость.

2. Коэффициент теплопроводности брикетов, предназначенных для использования в качестве донной постели, составляет 0,12 Вт/(м·К).

3. Показано, что внутри брикета при термообработке процессы спекания не реализуются: температура внутри брикета низкая. Соответственно, целостность брикета определяется прочностью его поверхностных (обожженных) слоев и остаточной прочностью связующего внутри куска. С точки зрения технологии брикетов для донной постели это означает, что брикеты должны иметь связующее, которое сохраняет прочность при нагреве. То есть брикеты изначально должны быть достаточно прочными, и при обжиге их связующее должно способствовать упрочнению при нагреве выше 400..500 °C, а при нагреве до уровня ниже этих значений – не разупрочняться.

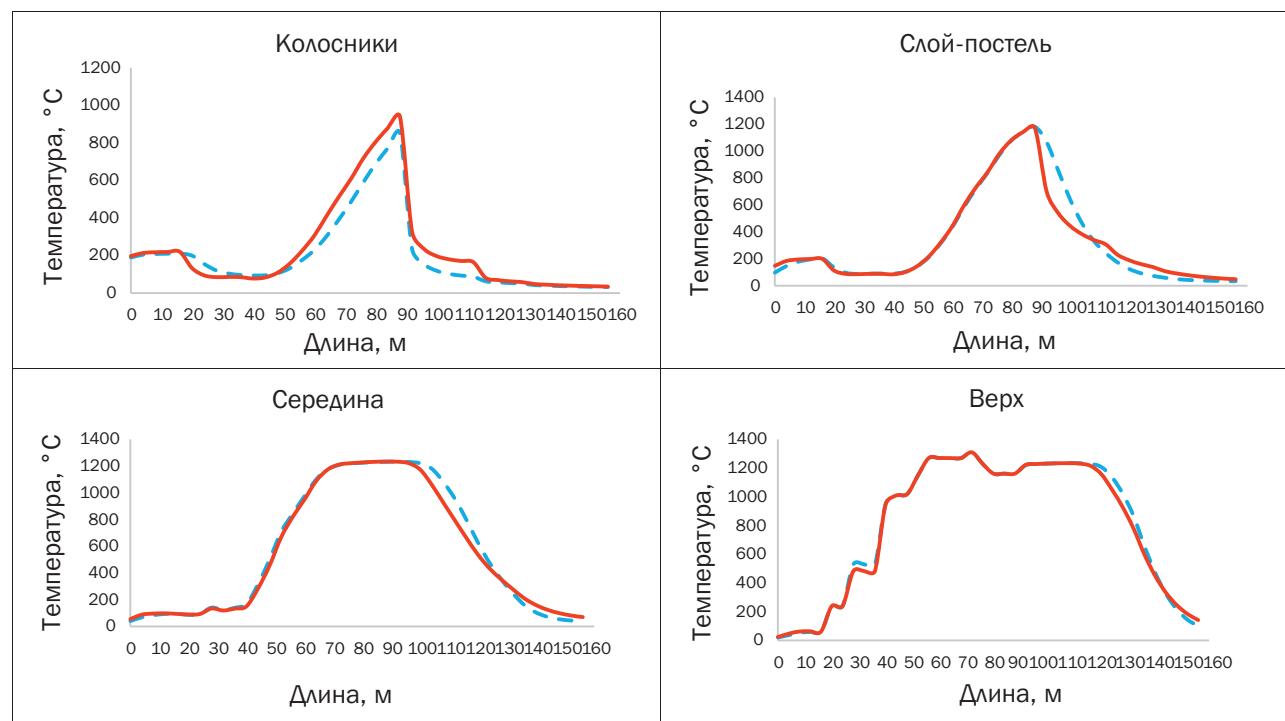


Рис. 6. Термограммы слоя на разных горизонтах при использовании обожженных окатышей и брикетов в качестве донной постели (сплошная линия – брикеты, пунктир – окатыши)

Fig. 6. Thermograms of the layer at different horizons when using fired pellets and briquettes as a bottom bed (solid line – briquettes, dotted line – pellets)

4. Изменения процесса обжига (при использовании брикетов) при корректировке температуры донной постели незначительны, а использование брикетов приводит к незначительному ускорению нагрева слоя в зоне

обжига и при этом принципиальных отличий в режимах термической обработки нет. Результаты исследования показали принципиальную возможность использования брикетов с позиции их теплофизических свойств.

Список источников

1. Ишимбаев А.В., Матюхин В.И., Берсенев И.С., Сабиров Э.Р., Бижанов А.М. Разработка технологии брикетов для искусственной постели // Технотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сборник докладов XIII Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных с междунар. участием (г. Екатеринбург, 15–16 мая 2025 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2025. С. 24–31.
2. Farjana S.H., Huda N., Mahmud M.A.P., Saidur R. A review on the impact of mining and mineral processing industries through life cycle assessment // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 231. P. 1200–1217. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.264>.
3. Li Qiuyu, Ma Ke, Su Zijian, Zhang Yuanbo, Jiang Tao. Insights into phase transformations of PM in high SO₂ and HF flue gas from iron ore pelletizing: implications for cleaner emission control strategy // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025. Vol. 13. Iss. 5. P. 118557. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.118557>.
4. Yonghe Ma, Qian Li, Xuling Chen, Yan Zhang, Yongbin Yang, Qiang Zhong. Reducing bentonite usage in iron ore pelletization through a novel polymer-type binder: impact on pellet induration and metallurgical properties // Journal of Materials Research and Technology. 2024. Vol. 30. P. 8019–8029. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.05.175>. EDN: SBSGPM.
5. Буданов И.А. Макроэкономические перспективы производства металла // Сталь. 2024. № 6. С. 47–53. EDN: BIAHFI.
6. Kapelyushin Yu.E. Comparative review on the technologies of briquetting, sintering, pelletizing and direct use of fines in processing of ore and technogenic materials // CIS Iron and Steel Review. 2023. Vol. 26. Iss. 2. P. 4–11. <https://doi.org/10.17580/cisisr.2023.02.01>. EDN: TVDICQ.
7. Bizhanov A., Chizhikova V. Agglomeration in metallurgy. Cham: Springer, 2020. 454 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-26025-5>.
8. Буткарев А.А., Буткарева Е.А. Сравнительный анализ обжиговых конвейерных машин и комбинированных установок решетка – трубчатая печь – охладитель для выбора технологии производства окатышей // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2021. Т. 77. № 8. С. 957–968. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-8-957-968>. EDN: DGOQES.
9. Фролов Ю.А. Агломерация: технология, теплотехника, управление, экология: монография. М.: Металлургиздат, 2016. 672 с.
10. Азимова Л.Г. Теоретические основы новых энергосберегающих технологий производства железорудных окатышей // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2025. № 47. С. 71–76. <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2025-47-71-76>. EDN: OBMXNO.
11. Геедерс М., Ченью Р., Курунов И., Лингарди О., Рикеттс Д. Современный доменный процесс. Введение / пер. с англ. и ред. И.Ф. Курунова. М.: Металлургиздат, 2016. 274 с.
12. Абзалов В.М., Горбачев В.А., Евстюгин С.Н., Клейн В.И., Леонтьев Л.И., Юрьев Б.П. Физико-химические и теплотехнические основы производства железорудных окатышей: монография. Екатеринбург: ООО «Научно-производственное внедренческое предприятие Торэкс», 2015. 335 с. EDN: YUMUCB.
13. Селезнев В.С., Мальцева В.Е., Чукин Д.М., Катаев А.П., Ложкин И.А. Сортировка и отгрузка окатышей. Экология фабрик окомкования. М.: Металлургиздат, 2024. 329 с.
14. Ishimbaev A.V., Bersenev I.S., Matyukhin V.I., Bragin V.V., Sabirov E.R. Increasing the productivity of conveyor machines by using an artificial bottom // Steel in Translation. 2024. Vol. 54. No. 4. P. 360–364. <https://doi.org/10.3103/S0967091224700761>. EDN: QZNCQS.
15. Пат. № 2824512, Российская Федерация, С1. Способ защиты колосникового поля с помощью постели из брикетов и его применение в конвейерной обжиговой или агломерационной машине / А.В. Ишимбаев, Э.Р. Сабиров, В.И. Матюхин, В.В. Брагин, С.П. Пигарев, А.И. Груздев, И.С. Берсенев; заявитель и патентообладатель ООО «НПВП Торэкс». Заявл. 27.11.2023; опубл. 08.08.2024. Бюл. № 22.
16. Bizhanov A., Kurunov I., Podgorodetskyi G., Dashevskyi V. Extruded briquettes – new charge component for the ferroalloys production // ISIJ International. 2014. Vol. 54. Iss. 10. P. 2206–2214. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.2206>.
17. Никишанин М.С., Сеначин П.К. Углеродсодержащие брикеты на разных связующих веществах, их теплофизические характеристики и использование в газогенераторах // Ползуновский вестник. 2009. № 1-2. С. 305–311. EDN: KZCPGV.
18. Павловец В.М. Особенности развития техники и технологии окомкования железорудной шихты в производстве окатышей // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2023. Т. 66. № 5. С. 529–537. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-5-529-537>. EDN: BGGSOY.
19. Zhang Yuan-bo, Chen Xi-jun, Su Zi-jian, Liu Shuo, Chen Fang, Wu Nan-yong, et al. Improving properties of fluxed iron ore pellets with high-silica by regulating liquid phase // Journal of Iron and Steel Research International. 2021. Vol. 29. P. 1381–1392. <https://doi.org/10.1007/s42243-021-00665-4>. EDN: YYKHPF.

20. Мальцева В.Е., Селезнев В.С., Чукин Д.М. Термообработка сырых окатышей: технология и схемы обжиговых машин: монография. М.: Металлургиздат, 2023. 719 с. EDN: KDEKOZ.

References

1. Ishimbaev A.V., Matyuhin V.I., Bersenev I.S., Sabirov E.R., Bishanov A.M. Development of briquette technology for artificial bedding. In: *Teplotekhnika i informatika v obrazovanii, nauke i proizvodstve: sbornik dokladov XIII Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyy uchonyh s mezhdunarodnym uchastiem = Heat Engineering and Information Science in Education, Science and Production: Proceedings of the 13th All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists with International Participation*. 15–16 May 2025, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin; 2025, p. 24-31. (In Russ.).
2. Farjana S.H., Huda N., Mahmud M.A.P., Saidur R. A review on the impact of mining and mineral processing industries through life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*. 2019;231:1200-1217. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.264>.
3. Li Qiuyu, Ma Ke, Su Zijian, Zhang Yuanbo, Jiang Tao. Insights into phase transformations of PM in high SO₂ and HF flue gas from iron ore pelletizing: implications for cleaner emission control strategy. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2025;13(5):118557. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.118557>.
4. Yonghe Ma, Qian Li, Xuling Chen, Yan Zhang, Yongbin Yang, Qiang Zhong. Reducing bentonite usage in iron ore pelletization through a novel polymer-type binder: impact on pellet induration and metallurgical properties. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024;30:8019-8029. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.05.175>. EDN: SBSGPM.
5. Budanov I.A. Macroeconomic prospects for metal production. *Stal'*. 2024;6:47-53. (In Russ.). EDN: BIAHFI.
6. Kapelyushin Yu.E. Comparative review on the technologies of briquetting, sintering, pelletizing and direct use of fines in processing of ore and technogenic materials. *CIS Iron and Steel Review*. 2023;26(2):4-11. <https://doi.org/10.17580/cisisr.2023.02.01>. EDN: TVDICQ.
7. Bishanov A., Chizhikova V. *Agglomeration in Metallurgy*. Cham: Springer; 2020, 454 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-26025-5>.
8. Butkarev A.A., Butkareva E.A. Comparative analysis of straight grate machines and combined facilities grate-tube-type kiln-cooler for selection technology of pellets production. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2021;77(8):957-968. (In Russ.). <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-8-957-968>. EDN: DGOQES.
9. Frolov Yu.A. *Agglomeration: technology, heat engineering, management, ecology: monograph*. Moscow: Metallurgizdat; 2016, 672 p. (In Russ.).
10. Azimova L.G. Theoretical foundations of new energy-saving technologies for the production of iron ore pellets. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2025;47:71-76. (In Russ.). <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2025-47-71-76>. EDN: OBMXNO.
11. Geerders M., Chaigneau R., Kurunov I., Lingiardi O., Ricketts D. *Modern blast-furnace ironmaking. Introduction / translated from English and edited by I.F. Kurunov*. Moscow: Metallurgizdat; 2016, 274 p. (In Russ.).
12. Abzalov V.M., Gorbachev V.A., Evstygyn S.N., Klein V.I., Leontiev L.I., Yuriev B.P. *Physicochemical and thermal engineering principles of iron ore pellets production*. Ekaterinburg: Torex Research and Development Company LLC; 2015, 335 p. (In Russ.). EDN: YUMUCB.
13. Seleznev V.S., Maltseva V.E., Chukin D.M., Kataev A.P., Lozhkin I.A. *Sorting and loading of pellets. Ecology of pelletizing factories*. Moscow: Metallurgizdat; 2024, 329 p. (In Russ.).
14. Ishimbaev A.V., Bersenev I.S., Matyukhin V.I., Bragin V.V., Sabirov E.R. Increasing the productivity of conveyor machines by using an artificial bottom bed. *Steel in Translation*. 2024;54(4):360-364. <https://doi.org/10.3103/S0967091224700761>. EDN: QZNCQS.
15. Ishimbaev A.V., Sabirov E.R., Matyukhin V.I., Bragin V.V., Pigarev S.P., Gruzdev A.I., Bersenev I.S. *Protection method of a grate field using a briquette bed and its use in a conveyor calcining or sintering machine*. Patent RF, no. 2824512; 2024. (In Russ.).
16. Bishanov A., Kurunov I., Podgorodetskyi G., Dashevskyi V. Extruded briquettes – new charge component for the ferroalloys production. *ISIJ International*. 2014;54(10):2206-2214. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.2206>.
17. Nikishanin M.S., Senachin P.K. Carbon-containing briquettes on different binders, their thermophysical characteristics and use in gas generators. *Polzunovskiy vestnik*. 2009;1-2:305-311. (In Russ.). EDN: KZCPGV.
18. Pavlovets V.M. Development of equipment and technology for pelletizing iron ore charge in production of pellets. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(5):529-537. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-5-529-537>. EDN: BGGSOY.
19. Zhang Yuan-bo, Chen Xi-jun, Su Zi-jian, Liu Shuo, Chen Fang, Wu Nan-yong, et al. Improving properties of fluxed iron ore pellets with high-silica by regulating liquid phase. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2021;29:1381-1392. <https://doi.org/10.1007/s42243-021-00665-4>. EDN: YYKHPF.
20. Maltseva V.E., Seleznev V.S., Chukin D.M. *Heat treatment of green pellets: technology and schemes of firing machines*. Moscow: Metallurgizdat; 2023, 719 p. (In Russ.). EDN: KKODOZ.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ишимбаев Алексей Владимирович,
аспирант,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620062, г. Екатеринбург,
ул. Мира, 19, Россия;
ведущий инженер-конструктор,
ООО «Научно-производственное
внедренческое предприятие Торэкс»,
620902, г. Екатеринбург, пос. Полеводство,
ул. Старожилов, 72, Россия
✉ a.ishimbaev@torex-npvp.ru

Берсенев Иван Сергеевич,
к.т.н., доцент,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620062, г. Екатеринбург,
ул. Мира, 19, Россия;
руководитель группы,
ООО «Научно-производственное
внедренческое предприятие Торэкс»,
620902, г. Екатеринбург, пос. Полеводство,
ул. Старожилов, 72, Россия
i.bersenev@torex-npvp.ru
<https://orcid.org/0009-0000-4270-6042>

Груздев Андрей Игоревич,
руководитель группы,
ООО «Научно-производственное
внедренческое предприятие Торэкс»,
620902, г. Екатеринбург, пос. Полеводство,
ул. Старожилов, 72, Россия
a.gruzdev@torex-npvp.ru

Спирин Николай Александрович,
д.т.н., профессор,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620062, г. Екатеринбург,
ул. Мира, 19, Россия
n.a.spirin@urfu.ru

Матюхин Владимир Ильич,
к.т.н., доцент,
старший научный сотрудник,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620062, г. Екатеринбург,
ул. Мира, 19, Россия
matyhin53@mail.ru

Торобеков Бектур Османович,
инженер,
ООО «Научно-производственное
внедренческое предприятие Торэкс»,
620902, г. Екатеринбург, пос. Полеводство,
ул. Старожилов, 72, Россия
b.torobekov@torex-npvp.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksei V. Ishimbaev,
Postgraduate Student,
Ural Federal University
named after the First President of Russia B.N. Yeltsin,
19, Mira St., Yekaterinburg 620062, Russia,
Leading Design Engineer,
Torex Research and Development Company LLC,
72, Starozhilov St., Polevodstvo cottage estate,
Yekaterinburg 620902, Russia
✉ a.ishimbaev@torex-npvp.ru

Ivan S. Bersenev,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Ural Federal University
named after the First President of Russia B.N. Yeltsin,
19, Mira St., Yekaterinburg 620062, Russia,
Leading Design Engineer,
Team Supervisor of
Torex Research and Development Company LLC,
72, Starozhilov St., Polevodstvo cottage estate,
Yekaterinburg 620902, Russia
i.bersenev@torex-npvp.ru
<https://orcid.org/0009-0000-4270-6042>

Andrei I. Gruzdev,
Team Supervisor of
Torex Research and Development Company LLC,
72, Starozhilov St., Polevodstvo cottage estate,
Yekaterinburg 620902, Russia
a.gruzdev@torex-npvp.ru

Nikolai A. Spirin,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Ural Federal University
named after the First President of Russia B.N. Yeltsin,
19, Mira St., Yekaterinburg 620062, Russia,
n.a.spirin@urfu.ru

Vladimir I. Matyukhin,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Senior Researcher,
Ural Federal University
named after the First President of Russia B.N. Yeltsin,
19, Mira St., Yekaterinburg 620062, Russia,
matyukhin53@mail.ru

Bektur O. Torobekov,
Engineer,
Torex Research and Development Company LLC,
72, Starozhilov St., Polevodstvo cottage estate,
Yekaterinburg 620902, Russia
b.torobekov@torex-npvp.ru

Мотыгулин Ильяс Асядулович,
инженер,
ООО «Научно-производственное
внедренческое предприятие Торэкс»,
620902, г. Екатеринбург, пос. Полеводство,
ул. Старожилов, 72, Россия
i.motygullin@torex-npvp.ru

Il'yas A. Motygulin,
Engineer,
Torex Research and Development Company LLC,
72, Starozhilov St., Polevodstvo cottage estate,
Yekaterinburg 620902, Russia
i.motygullin@torex-npvp.ru

Заявленный вклад авторов

Берсенев И.С., Ишимбаев А.И., **Матюхин В.И.**,
Спирин Н.А. – постановка задачи, участие в экспериментах, анализ и формулирование результатов и выводов. Груздев А.И. – математическое моделирование обжига окатышей. Торобеков Б.О., Мотыгулин И.А. – получение проб брикетов, выполнение экспериментов по сушке окатышей.

Ivan S. Bersenev, Aleksei V. Ishimbaev,
Vladimir I. Matyukhin, Nikolai A. Spirin – problem setting, participation in experiments, analysis and formulation of results and conclusions. Andrei I. Gruzdev – mathematical modeling of pellet firing. Bektur O. Torebekov, Il'yas A. Motygulin – briquette sampling and performing pellet drying experiments.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Authors' contribution

The authors declare no conflict of interests.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 09.08.2025 г.; одобрена после рецензирования 26.09.2025 г.; принятая к публикации 02.10.2025 г.

Information about the article

The article was submitted 09.08.2025; approved after reviewing 26.09.2025; accepted for publication 02.10.2025.