

Инженерная геология, мерзлотоведение, грунтоведение

УДК 662.8.053:662.813/814 (571.56-17)
<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-599-608>



Оригинальная статья

Брикетиrowание углей для обеспечения качественным топливом потребителей в Арктической зоне

Т. В. Москаленко, В. А. Михеев✉

Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация
✉labkiy@mail.ru

Аннотация

В статье представлены результаты экспериментального исследования по разработке экологически и экономически целесообразного способа брикетирования мелких классов бурых и каменных углей с использованием вторичного картона в качестве связующего вещества. Актуальность работы обусловлена сложными логистическими и климатическими условиями Арктической зоны Республики Саха (Якутия), где в рамках северного завоза уголь подвергается длительному хранению и многократным перегрузкам, вследствие чего дробится и теряет эффективность при сжигании. Предложенный подход направлен на локальную переработку мелкого угля непосредственно в местах потребления, что снижает зависимость от централизованных поставок и повышает энергетическую устойчивость удаленных поселений. В качестве исходного сырья использовались бурый уголь Кангаласского месторождения и каменный уголь Денисовского месторождения. Исследовано влияние содержания связующего вещества на прочность и теплотехнические характеристики брикетов, установлены оптимальные составы и технологические режимы производства брикетов. Эксперименты показали, что при добавлении 9–13 % картона (на сухую массу угля) для бурого угля и 9–10 % для каменного угля достигается механическая прочность брикетов, превышающая нормативное значение 7,8 МПа, при незначительном снижении теплоты сгорания. Технология реализуется без нагрева и дополнительных энергозатрат, что особенно важно для Арктики. Снижение остаточной прочности брикетов после контакта с водой может быть минимизировано за счет хранения брикетов под навесами. Технология брикетирования, основанная на предложенном способе, может быть внедрена в труднодоступных поселках, получающих уголь по северному завозу, непосредственно возле места их сжигания, что позволит снизить потери и вернуть в промышленное производство мелкие классы углей. Предложена модульная технологическая схема брикетирования, адаптированная для отдаленных районов, с возможностью сезонной эксплуатации и переориентации на местные угли в перспективе.

Ключевые слова: уголь, брикетирование, связующие вещества, картон, вторсырье, механическая прочность

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки России (тема № 0297-2021-0022, ЕГИСУ НИОКТР № 122011800089-2).

Для цитирования: Москаленко Т.В., Михеев В.А. Брикетирование углей для обеспечения качественным топливом потребителей в Арктической зоне. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(4):599–608. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-599-608>

Original article

Coal briquetting for supplying quality fuel to consumers in the Arctic Zone

Tatiana V. Moskalenko, Valery A. Mikhhev✉

Chersky Mining Institute of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation
✉labkiy@mail.ru

Abstract

This study developed a briquetting method for fine-grained lignite and bituminous coal using recycled cardboard as a binder to address environmental and economic challenges in fuel supply. This research is particularly relevant for the Arctic zone of the Republic of Sakha (Yakutia), where coal transported under the Northern Delivery program is

subjected to prolonged storage and repeated handling, leading to particle fragmentation and reduced combustion efficiency. We propose a decentralized processing solution to convert coal fines into briquettes directly at consumption sites, thereby decreasing reliance on centralized supply chains and enhancing the energy security of remote communities. For this study, feedstock consisted of lignite from the Kangalas deposit and bituminous coal from the Denisovskoye deposit. The influence of binder content on the mechanical strength and calorific value of the briquettes was investigated to establish optimal compositions and production parameters. The results indicate that incorporating 9–13 % cardboard (by dry coal mass) for lignite and 9–10 % for bituminous coal yields briquettes with a compressive strength exceeding 7.8 MPa, although a marginal reduction in heat of combustion was observed. The process operates at ambient temperature without external energy input, which is a critical advantage for Arctic implementation. Furthermore, while briquette strength decreases after water exposure, this can be mitigated by covered storage. Therefore, the proposed briquetting technology is suitable for implementation in remote settlements dependent on the Northern Delivery Program, as processing coal fines locally can reduce transport losses and reintroduce fine coal fractions into the fuel cycle. To this end, a modular, seasonally operable production unit adaptable to local coal varieties is recommended to maximize feasibility in isolated Arctic regions.

Keywords: coal, briquetting, binders, cardboard, recycled materials, mechanical strength

Funding. This study was conducted within the state assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. 0297-2021-0022, reg. No. 122011800089-2).

For citation: Moskalenko T.V., Mikhayev V.A. Coal briquetting for supplying quality fuel to consumers in the Arctic Zone. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(4):599–608. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-599-608>

Введение

Республика Саха (Якутия) в рамках административно-территориального устройства состоит из 34 улусов (районов), 13 из которых входят в Арктическую зону (АЗ) Российской Федерации. Кроме этих территорий АЗ РФ включает Мурманскую область, Ненецкий, Ямало-Ненецкий и Чукотский автономные округа, северные территории Республики Карелия, Республики Коми, Красноярского края и Архангельской области, а также острова в Северном Ледовитом океане. Эти районы с одной стороны характеризуются суровым климатом и труднодоступностью территорий, а с другой – отличаются уникальной природой, богатством ресурсов и стратегическим положением. Освоение и эффективное использование возможностей Арктики имеют огромное значение для экономического роста и укрепления позиций России на международной арене.

Комплексный подход к развитию Арктической зоны РФ предполагает реализацию широкого спектра мероприятий, направленных на укрепление экономики региона [1, 2]. Одним из ключевых факторов успешного освоения Арктики является наличие надежных источников энергии, позволяющих поддерживать комфортный температурный режим помещений, обеспечивать работу транспорта и оборудования. В этом направлении идет изучение возможности обеспечения регионов местным энергетическим сырьем, но основным видом топлива остается уголь.

При этом наиболее привлекательным с экономической и экологической точек зрения направлением представляется использование возобновляемых источников энергии. Развитие возобновляемой энергетики в мире в последние два десятилетия базируется на использовании солнечной и ветровой энергии, что обусловлено стремлением многих стран к переходу на экологически чистые источники и значительным прогрессом в масштабном промышленном освоении новых энергетических технологий [3].

В направлении использования возобновляемых источников энергии на территории Республики Саха (Якутия) смонтированы ветродизельный комплекс в пос. Тикси и ветроэлектростанция на полуострове Быков Мыс, которые продемонстрировали эффективную работу в условиях арктической зимы. Такие ветровые электростанции имеют свои преимущества и недостатки [3], системы развиваются при государственной поддержке не только в РС(Я) [4], но и в других труднодоступных регионах АЗ РФ [5].

Другим перспективным направлением создания системы эффективной энергообеспеченности АЗ и снижения зависимости от северного завоза топлива является освоение угольных месторождений, близких к потребителям. Как отмечается исследователями данного вопроса, для арктических районов Якутии проблемы повышения эффективности использования местных запасов углей взамен привозных в настоящее время вышли за рамки исключительно экономической сферы и имеют важное значение в рам-

ках социального, демографического развития, а также энергобезопасности населения [6, 7].

Для районов АЗ Якутии уголь остается жизненно важным топливно-энергетическим ресурсом, значение которого только возрастает для удаленных и труднодоступных районов. Анализ месторождений угля Арктической зоны Республики Саха (Якутия) [8, 9] показал, что месторождения, подготовленные к разработке, на этой территории отсутствуют, а следовательно, уголь все еще завозится и будет завозиться в рамках северного завоза из угледобывающих центральных, южных районов РС(Я) или других регионов РФ.

Доставка большей части углей в АЗ РС(Я) осуществляется в рамках северного завоза в летнее время года морским и речным транспортом, далее по зимникам в труднодоступные населенные пункты. При этом сложился следующий порядок обеспечения углем: дальность доставки до 2,7–2,9 тыс. км; многозвенная – до 2,5–3 лет – логистика; разновременность начала и окончания работы автозимников, навигаций рекой и морем; кратное превышение стоимости угля на месте потребления в сравнении с его стоимостью в месте отгрузки [10]. Огромные расстояния, распутица, ограниченная навигация, слаборазвитая береговая инфраструктура затрудняют доставку грузов. Но доставка грузов в районные центры – это лишь часть задачи, далее производится распределение в мелкие населенные пункты. В этих условиях угли проходят несколько перегрузок и имеют большие сроки хранения как в промежуточных складах, так и в конечной точке. Следовательно, уголь измельчается и снижается эффективность его использования в энергетических целях. Для рационального использования таких углей необходимо их брикетирование [11–13], которое может быть осуществлено как до вовлечения углей в логистику перевозки, так и непосредственно на месте применения, причем для последнего случая очевидна актуальность применения в качестве связующих веществ местных видов сырья.

Связующее вещество должно отвечать комплексу требований [14], среди которых: низкая себестоимость, свободный доступ в приобретении, улучшение энергетических свойств, уменьшение (или по крайней мере незначительное увеличение) зольности, придание брикету достаточной механической прочности и влагостойкости.

Разнообразие связующих веществ очень велико, и их перечень постоянно расширяется за счет новых научных изысканий. Например, связующими веществами в топливных брикетах могут быть: крахмал, сахар, целлюлоза, патока, портландцемент, глина, гипс, известь, декстран, декстрин, полисахарид, отходы винодельческого, сахарного, целлюлозно-бумажного, крахмального производства, кубовые остатки нефтепереработки, лигносульфонат, меласса, поливиниловый спирт, остатки ректификации таллового масла, сульфитно-дрожжевая бражка, полиэтилен, нефтебитум и другие [15–26].

Для большинства связующих веществ необходим нагрев брикетируемой смеси для перевода связующего в текучее состояние и возможности равномерного перемешивания смеси. Другой вариант связующих веществ – неорганические, такие, например, как жидкое стекло, известь, цемент. Такие связующие вещества снижают теплотехнические характеристики получаемых брикетов за счет увеличения зольности. Связующие вещества, относящиеся к продуктам химической переработки нефти, угля, сланцев, древесины, довольно эффективны, но в той или иной степени представляют опасность для окружающей среды как при производстве, так и при использовании в быту.

В соответствии с вышеописанными предпосылками, основная идея исследования заключалась в поиске связующих веществ, обеспечивающих прочную связь между частицами угля, не снижающих теплотехнические характеристики, экологически чистых и способных образовывать прочный угольный брикет без дополнительного теплового воздействия, с минимальным экологическим ущербом и имеющихся в наличии в местах брикетирования.

Таким образом, если рассматривать брикетирование угля непосредственно в местах его применения в АЗ РС(Я), то интересным вариантом связующего вещества мог бы быть картон, который поступает даже в отдаленные населенные пункты в качестве упаковочного материала вместе с разнообразными грузами и впоследствии утилизируется на местах. При этом технология брикетирования должна быть максимально простой и без привлечения дополнительных энергоресурсов. Учитывая хрупкость природы Арктики, переработка картона в связующее вещество для получения угольных брикетов также будет способствовать снижению накопления мусора на этих территориях.

Материалы и методы исследования

На качество брикета влияют физико-химические свойства исходного материала. Бурые угли относительно хорошо брикетируются. Каменные угли по сравнению с бурыми брикетируются труднее, поскольку обладают меньшей способностью к пластическим деформациям, которые и определяют способность к брикетированию.

В данной серии экспериментов в качестве сырья для получения топлива использовался бурый уголь Кангаласского месторождения (Ленский бассейн) и каменный уголь Денисовского месторождения (Южно-Якутский бассейн). Качество углей Южно-Якутского бассейна и их технологические свойства определяются степенью метаморфизма, которая обеспечила формирование в бассейне широкой марочной гаммы – от газовых (Г) до тощих (Т), с преобладанием коксующихся углей ряда Ж–КЖ–К. Но при их добыче и переработке возникает некоторое количество мелких классов, которые малопригодны как для коксования, так и для энергетического использования, и могут служить сырьем для получения брикетов.

Картон перед применением его в качестве связующего вещества для брикетирования угля необходимо заранее подготовить: измельчить, а затем замочить в воде. После полного набухания дать стечь лишней жидкости и измельчить до получения однородной пастообразной массы.

Брикетиrowание угля в лабораторных условиях проводилось при температуре 20–25 °С на испытательном гидравлическом прессе П-10 с максимальным удельным давлением 78 МПа. После удаления брикета из матрицы и до испытания его механической прочности он выдерживался для завершения процессов структурообразования и упрочнения. После этого проводилось испытание брикетов на прочность сжатием в соответствии с ГОСТ 21289-75 и на водопоглощение по ГОСТ 21290-2018.

Качественные характеристики брикетов должны соответствовать техническим показателям, предъявляемым потребителями к ним. Основными характеристиками являются показатели технического анализа (влаги, зольности, выход летучих веществ), теплотехнические характеристики (теплота сгорания) и прочностные (в том числе влагостойкость, т. е. остаточная прочность после контакта брикетов с водой). Первые две категории оцениваемых свойств в большой сте-

пени зависят от качества поступающего на брикетирование угля и категории связующего вещества. Прочностные характеристики брикетов определялись путем испытания брикетов на сжатие. Механическая прочность на сжатие брикетов по требованиям должна быть не менее 7,8 МПа [14], поэтому в дальнейших исследованиях при определении приемлемости брикетов по прочности и оценке эффективности процесса брикетирования проводилось сравнение экспериментальных данных с этим значением. Водопоглощение показывает, насколько увеличилась масса брикета, нормированное водопоглощение для брикетов составляет 3 %. Кроме того, при испытании брикетов на водопоглощение брикеты считаются водостойчивыми, если они после пребывания в воде сохраняют остаточную прочность не менее 40 % от первоначальной.

Результаты и обсуждение

Брикетиrowание бурого угля с картоном в качестве связующего. Эксперименты по брикетированию были проведены на пробе Кангаласского бурого угля крупностью 0–3 мм со следующими показателями технического анализа: влага лабораторная 7,3 %, зольность на сухую массу 11,8 %, выход летучих веществ на сухую беззольную массу 52,3 %, низшая теплота сгорания 22,38 МДж/кг. Механическая прочность на сжатие брикетов без добавления связующих веществ не превышает 2,0 МПа, что является очень низким показателем, при хранении и испытании на водопоглощение такие брикеты полностью теряют прочность и разрушаются.

Результаты испытаний брикетов с добавкой картона в количестве от 4,8 до 16,7 % на сухую массу угля приведены в табл. 1. В ходе проведения экспериментальных исследований было установлено, что максимальную прочность брикеты приобретали по истечении 5–7 суток после изготовления. Брикет, содержащий более 9,1 % картона на сухую массу, имел достаточную прочность. Теплота сгорания брикета с максимальным содержанием картона снизилась незначительно и составила 21,3 МДж/кг. Однако после пребывания в воде все исследуемые брикеты увеличили массу на 40–60 % и имели низкую остаточную прочность.

Брикетиrowание каменного угля с картоном в качестве связующего. Эксперименты по брикетированию были проведены на пробе Денисовского каменного угля (марка КЖ) крупностью

Таблица 1

Состав и свойства брикетов из бурого угля Кангаласского месторождения

Table 1

Composition and properties of briquettes from Kangalas deposit lignite

Показатель	Номер эксперимента			
	1	2	3	4
Масса сухого картона на 1 кг угля, г	50	100	150	200
Содержание связующего вещества в смеси, %	4,8	9,1	13,0	16,7
Механическая прочность брикетов на сжатие, МПа:				
сразу после брикетирования	1,8	2,0	2,1	2,3
через 1 сутки	4,8	5,7	6,9	8,1
через 3 суток	5,6	6,3	7,5	9,2
через 5 суток	6,3	7,9	9,3	10,5
через 7 суток	6,9	8,1	9,8	11,0
через 15 суток	6,7	8,0	9,6	11,1
через 30 суток	6,8	8,0	9,7	10,8
Водопоглощение, %	60,2	58,8	56,3	42,6
Остаточная прочность на сжатие, МПа	2,5	2,5	2,8	2,9

Таблица 2

Состав брикуетируемых смесей из каменного угля
Денисовского месторождения с картоном в качестве связующего

Table 2

Composition of briquetting mixtures
from Denisovskoye deposit bituminous coal with cardboard as a binder

Номера экспериментов	Содержание картона, %	Т : Ж (картон : вода)	Масса компонентов смеси, г		
			уголь	картон	вода
1, 5, 9, 14, 15	5	1 : 7,14	280	14	100
2, 10, 16	5	1 : 14,29	280	14	200
3, 6, 7, 8, 11, 13, 17	10	1 : 7,14	280	28	200
4, 12, 18	10	1 : 10,71	280	28	300

0-3 мм со следующими показателями технического анализа: влага лабораторная 3,5 %, зольность на сухую массу 26,2 %, выход летучих веществ на сухую беззольную массу 25,5 %, низшая теплота сгорания 26,7 МДж/кг. Механическая прочность на сжатие брикетов из каменного угля Денисовского месторождения без добавления связующих веществ не превышает 2,4 МПа. При хранении и испытании на водопоглощение брикеты полностью разрушаются. Состав брикуетируемых смесей из каменного угля с картоном в качестве связующего приведен в табл. 2, результаты испытания прочности брикетов на сжатие – в табл. 3.

Брикеты с 5%-м содержанием картона, имеющие прочность не менее 7,8 МПа (эксперименты

16 и 10), получены при содержании воды на размачивание картона (соотношение Т : Ж (картон : вода) 1 : 14). Брикеты с 10%-м содержанием картона имеют прочность выше 7,8 МПа, как при соотношении Т : Ж (картон : вода) 1 : 7, так и при 1 : 14 (эксперименты 4, 8, 11–13, 17, 18).

На рисунке показано изменение механической прочности на сжатие для брикетов с добавлением картона 5 и 10 % и соотношением Т : Ж (картон : вода) 1 : 7. Брикеты с 5%-м содержанием картона, имеют прочность ниже 7,8 МПа, с 10%-м содержанием – выше 7,8 МПа, причем максимальные значения прочности брикетов достигаются на 3–5 сутки выдержки в условиях комнатной температуры, при этом отмечена интенсивная потеря массы брикетов (см. рисунок)

Таблица 3
Прочностные характеристики брикетов
из каменного угля с картоном

Table 3

Strength characteristics
of bituminous coal briquettes with cardboard

Номер эксперимента	Время выдержки перед испытанием, сутки	Механическая прочность на сжатие, МПа	Потеря массы брикета, %
1	1	3,61	5,8
2	1	5,32	5,3
3	1	6,52	5,9
4	1	11,89	6,6
5	1	2,36	5,0
6	1	6,24	5,4
7	1	6,71	6,7
8	3	8,60	7,7
9	3	4,89	5,9
10	5	9,43	6,8
11	5	9,48	7,3
12	5	15,72	7,1
13	6	9,30	6,9
14	7	4,72	6,2
15	7	4,76	7,0
16	7	9,25	6,6
17	7	8,74	8,3
18	7	15,50	7,8

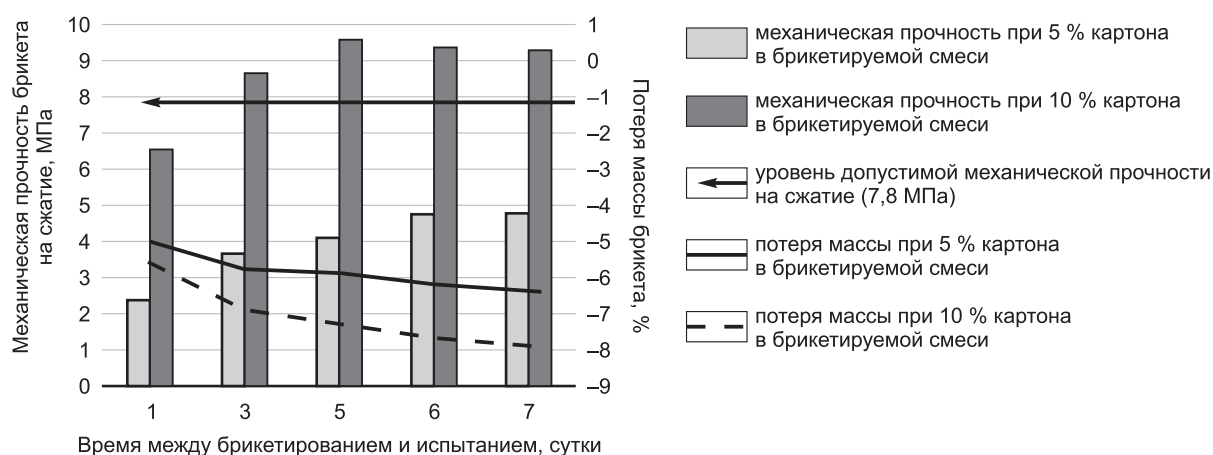
в течение первых трех суток, что объясняется снижением их влажности.

Для брикетов из каменного угля Денисовского месторождения низшая теплота сгорания при влажности брикета 1,1 % составляет 25,2 МДж/кг,

сопоставимые с этим показателем для исходного угля, и говорит о том, что связующее на основе картона не снижает теплотворную способность. Испытания каменноугольных брикетов на водопоглощение показали, что брикеты после 30-минутного нахождения в воде не разрушаются, при этом влагоемкость брикетов из каменного угля ниже, чем из бурого, и составляет 40–50 %. Однако остаточная механическая прочность брикетов достаточно низкая (2,5–3,6 МПа), но выше, чем прочность брикетов без связующего.

Возможные варианты реализации технологии брикетирования углей с картоном в качестве связующего в районах Арктической зоны. В общем виде технология брикетирования углей с применением связующих реализуется по следующей схеме (в скобках указан номер технологической операции): прием исходного материала (1), шихтовка (2), классификация (3) и измельчение (4) углей; сушка угля (5); подготовка связующего вещества (6) (измельчение, расплавление и т. п., что зависит от его вида); дозирование и смешение угля со связующим (7) (эта операция чаще всего сопряжена с нагревом смеси); формование брикетов на прессе (8); сушка и охлаждение брикетов (9); отгрузка брикетов потребителям (10).

Анализируя эту цепочку технологических операций, можно заключить, что при брикетировании в условиях Арктической зоны при организации брикетных работ операции (1)–(5) будут в минимальном объеме, так как уголь уже мелкий и пролежавший некоторое время на складе. Операции (6) и (7) в разрабатываемой технологии лучше проводить без дополнительных на-



Изменение механической прочности на сжатие и массы брикетов из каменного угля со связующим на основе картона
Change in mechanical compressive strength and mass of coal briquettes with cardboard-based binder

гревов связующего вещества, исходного сырья и смеси, так как в условиях АЗ нет лишних ресурсов энергии. Операцию сушки (9) также необходимо предусмотреть без дополнительного нагрева, в естественных условиях. Таким образом, технология брикетирования угля с применением картона в качестве связующего вещества будет состоять из следующих операций: прием сырья; классификация исходного угля по крупности –3 мм; подготовка связующего вещества; дозирование и смешение угля со связующим; формование брикетов на прессе; сушка брикетов в естественных условиях; упаковка, складирование или отгрузка брикетов потребителям. При организации производства непосредственно возле мест потребления брикетов в приеме сырья и отгрузке брикетов нет необходимости.

Для реализации предлагаемой технологической схемы брикетирования необходимо выбрать соответствующее оборудование и механизмы. На стадии приема сырья необходим грохот, обеспечивающий рассев поступающего угля на два класса крупности: –3 мм и +3 мм. В результате отсева уголь крупностью более 3 мм может сразу отгружаться потребителям. Уголь мелкого класса направляется на следующую стадию технологического цикла – смешивание со связующим. Для перемещения угля необходимо предусмотреть ленточные конвейеры соответствующих мощности и производительности. На стадии подготовки связующего необходим измельчитель (шредер) картона, позволяющий получить мелкую фракцию при измельчении (размер кусков картона после измельчения не более 1–2 см). После измельчения картона полученную фракцию необходимо замочить в воде для набухания. На основании проведенных лабораторных исследований данный процесс занимает, как правило, 24 ч. Набухший картон необходимо тщательно измельчить до получения однородной пастообразной массы при помощи высокоскоростного роторного смесителя. Полученная масса подается в шнековый смеситель, перемешивается с углем и далее шнековым питателем подается на брикетный пресс. Брикетирование полученной смеси осуществляется на штемпельном прессе с кривошипно-шатунным механизмом привода рабочего органа. Данный вид брикетных прессов обеспечивает достаточное удельное давление брикетирования. Заключительной стадией процесса является складирование на хранение

под навесы при расположении брикетного производства в непосредственной близости к месту использования или тарирование готовой продукции при необходимости транспортировки. Тарирование может осуществляться в различную тару, например, в мешки по 50 кг или так называемые биг-бэги весом наполнения от 0,2 до 2 т. Основным условием тары является обеспечение герметичности внутреннего содержимого. Предлагаемая технологическая схема вполне реализуема в модульном виде. На сегодня на рынке имеется все необходимое оборудование для комплектации и организации модульного мобильного комплекса брикетирования угля различной производительности.

Данные комплексы могут эксплуатироваться (в том числе и сезонно) в отдаленных населенных пунктах, снабжающихся углем в рамках северного завоза, что позволит вернуть в промышленное производство угли, подвергшиеся самоизмельчению при доставке и длительном хранении.

В дальнейшем, при переходе с привозного угля на уголь из местных месторождений проблема самоизмельчения и снижения качества углей при их хранении и транспортировке останется, соответственно, наличие комплексов по брикетированию углей позволит снизить потери мелких классов углей, и, если в поселке был смонтирован и запущен в эксплуатацию комплекс для брикетирования мелких классов привозного угля, он легко может быть перепрофилирован для брикетирования другого угля путем корректировки количества связующего в смеси.

Авторы готовы предоставить заинтересованным организациям более детализированную информацию по экспериментальным и технологическим вопросам, связанным с брикетированием угля, а также по подбору оборудования на основе проведенных исследований.

Заключение

В результате экспериментальных исследований процесса брикетирования бурых и каменных углей с картоном в качестве связующего установлено, что возможно получение прочных брикетов из бурого угля с добавлением 9–13 % картона на сухую массу угля и из каменного угля при добавлении 9–10 % картона на сухую массу угля. При этом буроугольные брикеты на 5–7 суток и каменноугольные на 3–5 суток после брикетирования приобретают достаточную механическую прочность. Применение данного связующего

не снижает теплотехнические свойства, позволяет утилизировать картон, не вредит экологии. Недостатком данного метода брикетирования является высокое водопоглощение брикетов при длительном нахождении в воде и, следовательно, значительная потеря механической прочности. Однако влияние этого фактора возможно снизить путем организации такого брикетного производства непосредственно на месте использования брикетов с обустройством места складирования под навесами, что позволит минимизировать контакт брикетов с атмосферными осадками. Брикетирование ведется без дополнительного расхода энергии на нагрев угля, связующих веществ или смеси, что является приемлемым для условий АЗ Республики Саха (Якутия), где возможно организовать на местах брикетные производства для мелкого угля, полученного в рамках северного завоза.

Таким образом, в результате экспериментальных исследований разработан новый способ брикетирования бурых и каменных углей с применением картона в качестве связующего вещества, позволяющий снизить потери и вернуть в промышленное производство угли мелких классов. Способ может стать основой для создания модульного мобильного комплекса по брикетированию угля в населенных пунктах Арктической зоны Республики Саха (Якутия).

Список литературы / References

1. Костюченко С.Л. Минерально-сырьевая база как основа формирования социально-экономической политики в Арктике. *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2017;(5):27–35.
2. Kostyuchenko S.L. Mineral resource base as the basis for the formation of social and economic policy in the Arctic. *Mineral Resources of Russia. Economics & Management*. 2017;(5):27–35. (In Russ.)
3. Павленко В.И., Куценко С.Ю. Минерально-сырьевая база Арктической зоны Российской Федерации в системе обеспечения стратегических целей развития страны. *Власть*. 2025;33(1):93–99.
4. Pavlenko V.I., Kutsenko S.Y. Mineral resource base of the Arctic Zone of the Russian Federation in the system of maintenance of strategic targets of development of the country. *Vlast' (The Authority)*. 2025;33(1):93–99. (In Russ.)
5. Попель О.С., Фрид С.Е., Лисицкая Н.В. и др. Анализ энергетической эффективности использования ветроэнергетических ресурсов в России, включая Арктику. *Арктика: экология и экономика*. 2025;15(3):103–115. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2025-3-103-115>.
6. Popel O.S., Frid S.E., Lisitskaya N.V., et al. Analysis of energy efficiency of wind energy resources in Russia, including the Arctic. *Arctic: Ecology and Economy*. 2025;15(3):103–115. (In Russ.) <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2025-3-103-115>.
7. Salonen H. All habits die hard: Exploring the path dependence and lock-ins of outdated energy systems in the Russian Arctic. *Energy Research & Social Science*. 2021;78:102–149. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102149>.
8. Минин В.А., Целищева М.А. Ресурсы ветра западного сектора Арктической зоны Российской Федерации и возможные направления их использования. *Арктика: экология и экономика*. 2023;3(1):72–84. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-1-72-84>.
9. Minin V.A., Tselishcheva M.A. Wind resources of the western sector of the Arctic zone of the Russian Federation and possible directions of their use. *Arctic: Ecology and Economy*. 2023;3(1):72–84. (In Russ.) <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-1-72-84>.
10. Ткач С.М., Гаврилов В.Л. Предпосылки эффективного освоения угольных месторождений центральных и арктических районов Якутии. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2013;(S4):95–102.
11. Tkach S.M., Gavrillov V.L. Productive coal mining background in central and Arctic Yakutia. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2013;(S4):95–102. (In Russ.)
12. Батугина Н.С., Гаврилов В.Л., Хоютанов Е.А., Попова К.С. Оценка вариантов завоза и использования угля при освоении месторождений золота Арктической зоны Республики Саха (Якутия). *Арктика: экология и экономика*. 2021;11(2):152–163. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-2-152-163>.
13. Batugina N.S., Gavrillov V.L., Khoitutanov E.A., Popova K.S. Assessment of coal supply and use in the development of gold deposits in the Arctic zone of the Republic of Sakha (Yakutia). *Arctic: Ecology and Economy*. 2021;11(2):152–163. (In Russ.) <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-2-152-163>.
14. Батугина Н.С. Использование местных и привозных углей при освоении месторождений Арктической зоны Республики Саха (Якутия) В кн.: Григорьева Е.Э. (ред.) *Устойчивый Север: общество, экономика, экология, политика: Сборник трудов VII Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 100-летию образования Якутской АССР*. Якутск: Изд-во СВФУ им. М.К. Аммосова; 2022. С. 25–35.
15. Batugina N.S. The use of local and imported coals in the development of deposits in the Arctic zone of the Republic of Sakha (Yakutia). In: Grigorieva E.E. (ed.) *Sustainable North: society, economics, ecology, politics: Collection of proceedings of the 7th All-Russian scientific and practical conference dedicated to the 100th anniversary of the formation of the Yakut Autonomous Soviet Socialist Republic*. Yakutsk: NEFU Publishing House; 2022, pp. 25–35. (In Russ.)
16. Кошкарев М.В. Анализ основных показателей добычи каменного угля на континентальных территориях арктической зоны Российской Федерации в период 2000–2020 гг. *Экономические науки*. 2021;(205):59–64. <https://doi.org/10.14451/1.20559>.
17. Koshkarev M.V. Analysis of the main indicators of mining of stone coal in the territories of the Arctic zone of the Russian Federation in the period 2000–2020. *Economic Sciences*. 2021;(205):59–64. (In Russ.) <https://doi.org/10.14451/1.20559>.
18. Батугина Н.С., Хоютанов Е.А., Гаврилов В.Л., Федоров В.И. Экономическое обоснование выбора наиболее перспективных месторождений угля для обеспечения топливом арктических районов Республики Саха (Якутия). *Горная промышленность*. 2025;(4S):12–17. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4S-12-17>.

Batugina N.S., Khoiutanov E.A., Gavrilo V.L., Fedorov V.I. Economic justification for selecting the most promising coal deposits to supply fuel to the Arctic regions of the Republic of Sakha (Yakutia). *Russian Mining Industry*. 2025;(4S):12–17. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4S-12-17>

11. Матвеев А.И., Попова К.С. Проблема повышения эффективности использования углей для потребителей в условиях Крайнего Севера. *Успехи современного естествознания*. 2022;(12):175–180. <https://doi.org/10.17513/use.37967>

Matveev A.I., Popova K.S. The problem of increasing the efficiency of coal use for consumers in the Far North. *Advances in Modern Natural Science*. 2022;(12):175–180. (In Russ.) <https://doi.org/10.17513/use.37967>

12. Жалгасулы Н.Ж., Бектибаев У.А., Исмаилова А.А. Перспективы разработки и переработки бурых углей Казахстана. *Известия Национальной Академии наук Кыргызской Республики*. 2023;(S8):427–432.

Zhalgasuly N.Zh., Bektiybaev U.A., Ismailova A.A. Prospects for development and processing of Kazakhstan brown coals. *Bulletin of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic*. 2023;(S8):427–432. (In Russ.)

13. Сайфутдинов Д.Р., Заречнев А.В., Нарский В.А. Применение технологии брикетирования угля на примере угольной компании Кузбасса. В кн.: *Рекультивация выработанного пространства: проблемы и перспективы: Сборник статей участников VI Международной научно-практической Интернет-конференции, г. Белово, 14–18 декабря 2020 г.* Белово, Кемерово, Новосибирск, Шумен, Велико Тырново: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева; 2021. С. 87–90.

Saifutdinov D.R., Zarechnev A.V., Narsky V.A. Application of coal briquetting technology on the example of a Kuzbass coal company. In: *Reclamation of mined-out spaces: problems and prospects: Collection of articles by participants of the 6th International Scientific and Practical Internet Conference, Belovo, December 14–18, 2020*. Kemerovo: Kuzbass State Technical University named after T. F. Gorbachev; 2021, pp. 87–90. (In Russ.)

14. Елишевич А.Т. *Брикетирование полезных ископаемых*. М: Недра; 1989. 300 с.

Elishevich A.T. *Briquetting of minerals*. Moscow: Nedra; 1989. 300 p. (In Russ.)

15. Попов С.Н., Заровняев Б.Н., Буренина О.Н., Николаева Л.А. и др. Особенности брикетирования бурых углей Якутии. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2014;(9):405–412.

Popov S.N., Zarovnyaev B.N., Burenina O.N., Nikolaeva L.A. Features of lignite briquetting in Yakutia. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2014;(9):405–412. (In Russ.)

16. Патент № 2147029 Российская Федерация, МПК C10L 5/12, 5/14, 5/16, 5/40. C1.Топливный брикет и способ его получения : № 99107373/04 : заявл. 05.04.1999; опубл. 27.03.2000 / Лурый В.Г. 5 с.

Patent No. 2147029, Russian Federation, IPC C10L 5/12, 5/14, 5/16, 5/40. C1. Fuel briquette and method for producing it: No. 99107373/04; registered 05.04.1999; published 27.03.2000 / Lury V.G. 5 p.

17. Патент № 2661881 Российская Федерация, МПК C10L 5/08. Способ брикетирования угля : № 2018114844 : заявл. 20.04.2018; опубл. 20.07.2018 / Альшанская А.А., Демченко И.И., Цыбульский С.И. 5 с.

Patent No. 2661881, Russian Federation, IPC C10L 5/08. Method of coal briquetting: No. 2018114844; registered

20.04.2018; published 20.07.2018 / Alshanskaya A.A., Demchenko I.I., Tsybulsky S.I. 5 p.

18. Патент № 2847039 Российская Федерация, МПК C10L 5/14. Способ получения угольных брикетов : № 2024103396 : заявл. 09.02.2024; опубл. 24.09.2025 / Михеев В.А., Москаленко Т.В., Ворсина Е.В. 5 с.

Patent No. 2847039, Russian Federation, IPC C10L 5/14. Method for producing coal briquettes: No. 2024103396; registered 09.02.2024; published 24.09.2025 / Mikhhev V.A., Moskalenko T.V., Vorsina E.V. 5 p.

19. Москаленко Т.В., Михеев В.А., Ворсина Е.В. Перспективы внедрения брикетирования углей в Республике Саха (Якутия). *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018;(S39):3–11. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-7-39-3-11>.

Moskalenko T.V., Mikhhev V.A., Vorsina E.V. Development of briquetting in the Republic Sakha (Yakutia). *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2018;(S39):3–11. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-7-39-3-11>.

20. Буравчук Н.И., Гурьянова О.В. Брикетирование мелкозернистого угольного сырья со связующими. *Химия твердого топлива*. 2021;(3):18–23. <https://doi.org/10.31857/S0023117721030051>.

Buravchuk N.I., Guryanova O.V. Briquetting of fine-grained coal raw materials with binders. *Chemistry of Solid Fuel*. 2021;(3):18–23. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0023117721030051>.

21. Размахнин К.К., Хаткова А.Н., Шумилова Л.В., Номоконова Т.С. Разработка технологии брикетирования отходов добычи бурых углей. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(9-1):288–298. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_288.

Razmakhnin K.K., Khatkova A.N., Shumilova L.V., Nomokonova T.S. Development of technology for briquetting brown coal mining waste. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2023;(9-1):288–298. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_288.

22. Джолдошева Т.Д., Осоров И.А., Абдумомун Уулу С., Айтбаева А.А. Разработка технологии брикетирования Кожокеленского угля на основе продуктов дикорастущей растительности. *Известия Ошского технологического университета*. 2025;(1):23–32.

Dzholdosheva T.D., Osorov I.A., Abdumomun Uulu S., Aitbaeva A.A. Development of briquetting technology for Kozhokelen coal based on wild plant products. *Bulletin of the Osh Technological University*. 2025;(1):23–32. (In Russ.)

23. Жукова А.Р. Подбор связующего в производстве угольных брикетов. *Естественные и технические науки*. 2024;189(2):221–224.

Zhukova A.R. Selection of a binder in the production of coal briquettes. *Natural and Technical Sciences*. 2024;189(2):221–224. (In Russ.)

24. Батухтин С.Г., Кобылкин М.В., Риккер Ю.О., Рудой В.И. Обогащение угольной мелочи путем брикетирования с добавлением природного связующего компонента. В кн.: Халин А.Н. (ред.) *Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: Материалы Национальной с международным участием научно-практической конференции студентов, аспирантов, ученых и специалистов, г. Тюмень, 20–22 декабря 2022 г.* Тюмень: Тюменский индустриальный университет; 2022. С. 148–151.

Batukhtin S.G., Kobylkin M.V., Rikker Yu.O., Rudoy V.I. Coal fines beneficiation by briquetting with the addition of

a natural binding component. In: Khalin A.N. (ed.) *Energy saving and innovative technologies in the fuel and energy complex: Proceedings of the National scientific and practical conference with international participation of students, graduate students, scientists and specialists, Tyumen, December 20–22, 2022*. Tyumen: Tyumen Industrial University; 2022, pp. 148–151. (In Russ.)

25. Ким С.В., Богоявленская О.А., Кударинов С.Х. Получение брикетированного бездымного топлива из термообработанной мелочи энергетических углей. *Уголь*. 2020;1131(6):41–45. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-6-41-45>.

Kim S.V., Bogoyavlenskaya O.A., Kudarinov S.Kh. Production of briquetted smokeless fuel from heat-treated fines of power-generating coals. *Coal*. 2020;1131(6):41–45. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-6-41-45>.

26. Хакимов А.А., Салиханова Д.С., Абдурахимов А.Х., Жумаева Д.Ж. Использование местных отходов в производстве угольных брикетов. *Universum: химия и биология*. 2020;70(4).17–2123.

Khakimov A.A., Salikhanova D.S., Abdurakhimov A.Kh., Zhumaeva D.Zh. Use of local waste in the production of coal briquettes. *Universum: chemistry and biology*. 2020;70(4).17–21. (In Russ.)

Об авторах

МОСКАЛЕНКО Татьяна Владимировна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-2782-2488>, ResearcherID: AFN-8465-2022, Scopus Author ID: 6603241867, SPIN: 2511-1371, e-mail: labkiy@mail.ru

МИХЕЕВ Валерий Александрович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0009-0009-1531-4516>, ResearcherID: LPQ-0824-2024, Scopus Author ID: 57198098218, SPIN: 2112-1576, e-mail: labkiy@mail.ru

Вклад авторов

Москаленко Т.В. – проведение исследования, проведение статистического анализа, редактирование рукописи; **Михеев В.А.** – разработка концепции, проведение исследования, ресурсное обеспечение исследования, редактирование рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

MOSKALENKO, Tatiana Vladimirovna, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-2782-2488>, ResearcherID: AFN-8465-2022, Scopus Author ID: 6603241867, SPIN: 2511-1371, e-mail: labkiy@mail.ru

MIKHEEV, Valery Alexandrovich, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0009-0009-1531-4516>, ResearcherID: LPQ-0824-2024, Scopus Author ID: 57198098218, SPIN: 2112-1576 e-mail: labkiy@mail.ru

Authors' contribution

Moskalenko T.V. – investigation, formal analysis, writing – review & editing; **Mikheev V.A.** – conceptualization, investigation, resources, writing – review & editing

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 18.09.2025

Поступила после рецензирования / Revised 12.11.2025

Принята к публикации / Accepted 04.12.2025