Оригинальная статья

УДК 622.271.3 © Ю.С. Кузнецова✉[1], Ю.В. Даус[2], А.П. Мартынов[3], Н.Н. Грачева[4], Н.Б. Руденко[3], А.Т. Умиров[5], 2025

[1] Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, г. Новороссийск, Россия
[2] ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет», 350044, г. Краснодар, Россия
[3] Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 347740, г. Зерноград, Россия
[4] ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», 344000, г. Ростов-на-Дону, Россия
[5] Термезский государственный университет, 190100, г. Термез, Узбекистан
✉ e-mail: julx@bk.ru

Original Paper

UDC 622.271.3 © Yu.S. Kuznetsova✉[1], Yu.V. Daus[2], A.P. Martynov[3], N.N. Gracheva[4], N.B. Rudenko[3], A.T. Umirov[5], 2025

[1] Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, Novorossiysk, 353924, Russian Federation
[2] Kuban State Agrarian University, Krasnodar, 350044, Russian Federation
[3] Azov-Black Sea Engineering Institute, Donskoy State Agrarian University, Zernograd, 347740, Russian Federation
[4] Don State Technical University, Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation
[5] Termez state university, Termez, 190100, Uzbekistan
✉ e-mail: julx@bk.ru

Использование бурого угля для производства водоугольного топлива

Utilisation of lignite for the production of water-coal fuel

DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2025-6-28-32

КУЗНЕЦОВА Ю.С.
Канд. пед. наук, доцент, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, г. Новороссийск, Россия, e-mail: julx@bk.ru

ДАУС Ю.В.
Канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет», 350044, г. Краснодар, Россия, e-mail: daus.i@edu.kubsau.ru

МАРТЫНОВ А.П.
Канд. техн. наук, доцент, Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 347740, г. Зерноград, Россия, e-mail: alpmart@mail.ru

ГРАЧЕВА Н.Н.
Канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», 344000, г. Ростов-на-Дону, Россия, e-mail: grann72@mail.ru

В статье рассматривается актуальная проблема обеспечения энергетических потребностей в условиях истощения запасов традиционного топлива и растущих экологических требований. Предложено использование водоугольного топлива (ВУТ) как альтернативного источника энергии. Показано, что предварительная термическая обработка угля способствует улучшению его энергетических характеристик за счет снижения содержания влаги и летучих веществ. Определено, что механохимическая активация в дезинтеграторе и кавитаторе играет важную роль в повышении реакционной способности и стабильности ВУТ, позволяя избежать использования пластификаторов. В рамках исследования проведены экспериментальные работы по производству ВУТ из Ирша-Бородинского бурого угля. Установлено, что применение циклонного термореактора для термической обработки приводит к значительному снижению влажности и увеличению теплоты сгорания угля. В результате получено ВУТ с определенными характеристиками, включая содержание углерода, водорода, влажность и низшую теплоту сгорания.

Ключевые слова: *водоугольное топливо, бурый уголь, термическая обработка, механохимическая активация, энергетическая эффективность, возобновляемые источники энергии, экология, альтернативные виды топлива.*

Для цитирования: Использование бурого угля для производства водоугольного топлива / Ю.С. Кузнецова, Ю.В. Даус, А.П. Мартынов и др. // Уголь. 2025;(6):28-32. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-6-28-32.

Abstract

The article deals with the urgent problem of providing energy needs in the conditions of depletion of traditional fuel reserves and growing environmental requirements. The use of water-coal fuel (WCF) as an alternative energy

source is proposed. It is shown that preliminary thermal treatment of coal improves its energy characteristics by reducing the content of moisture and volatile substances. It is determined that mechanochemical activation in the disintegrator and cavitator plays an important role in increasing the reactivity and stability of WCF, allowing to avoid the use of plasticisers. Experimental work on the production of WCF from Irsha-Borodino brown coal was carried out as part of the study. It was found that the use of cyclone thermoreactor for thermal treatment leads to a significant decrease in moisture content and increase in the heat of combustion of coal. As a result, WCF with certain characteristics, including carbon content, hydrogen content, moisture content and lower heat of combustion were obtained.

Keywords

Water-coal fuel, lignite, thermal treatment, mechanochemical activation, energy efficiency, renewable energy sources, ecology, alternative fuels.

For citation

Kuznetsova Yu.S., Daus Yu.V., Martynov A.P., Gracheva N.N., Rudenko N.B., Umirov A.T. Utilisation of lignite for the production of water-coal fuel. *Ugol'*. 2025;(6):28-32. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-6-28-32.

РУДЕНКО Н.Б.

Канд. техн. наук, доцент,
Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ,
347740, г. Зерноград, Россия,
e-mail: nelli-rud@yandex.ru

УМИРОВ А.Т.

Канд. техн. наук, доцент,
Термезский государственный университет,
190100, г. Термез, Узбекистан,
e-mail: abdugapporumirov@gmail.com

ВВЕДЕНИЕ

Проблема обеспечения энергетических потребностей современного мира становится все более актуальной на фоне истощения запасов традиционных видов топлива и растущего внимания к вопросам экологии [1, 2]. В настоящее время энергетический сектор в значительной степени зависит от ископаемого топлива, такого как нефть, газ и уголь, что приводит к высоким выбросам парниковых газов и загрязнению окружающей среды. В связи с этим поиск альтернативных и более экологически чистых источников энергии является критически важным [3, 4].

Существует ряд подходов к решению этой проблемы. Во-первых, развитие возобновляемых источников энергии, таких как солнечная, ветровая и гидроэнергетика, представляется перспективным. Однако их широкое внедрение сталкивается с проблемами нестабильности генерации, зависимости от погодных условий и значительными капитальными затратами. Во-вторых, повышение энергоэффективности включает в себя снижение потерь энергии при производстве, передаче и потреблении, является важным направлением [5]. Но и этот путь требует значительных усилий и изменений в технологиях и инфраструктуре. В-третьих, использование альтернативных видов топлива, в том числе водоугольного топлива (ВУТ), представляет собой еще один перспективный способ решения проблемы. ВУТ представляет собой смесь из угля, воды и добавок, позволяет снизить зависимость от углеводородного сырья, сократить выбросы вредных веществ, а также использовать уголь в установках, изначально предназначенных для жидкого топлива [6, 7, 8, 9].

В этом контексте изучение и совершенствование технологий производства и применения ВУТ приобретают особую актуальность. Рост цен на нефть в прошлом неоднократно стимулировал интерес к ВУТ, и в настоящее время, когда мир стремится к снижению углеродного следа, ВУТ предстает как потенциально важное звено в энергетическом переходе [11, 12, 13, 14]. В частности, Россия обладает значительными запасами бурых углей, которые можно использовать для производства ВУТ [15, 16]. Использование этой технологии может способствовать диверсификации энергетического баланса страны, снижению зависимости от импорта. В рамках этой работы рассматривается процесс термической обработки угля, а также процесс подготовки водоугольной суспензии с использованием инновационного оборудования для получения топлива с улучшенными характеристиками.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках данной работы были проведены экспериментальные исследования, направленные на разработку технологии производства водоугольного топлива (ВУТ) из ирша-бородинского бурого угля. Общий план экспериментальных работ включал в себя несколько этапов, начиная с подготовки исходного сырья – бурого угля марки Б2Р Канско-Ачинского угольного бассейна, далее термическую обработку угля для удаления влаги и летучих веществ и, наконец, приготовление водоугольной суспензии с использованием инновационного оборудования.

В качестве основного оборудования для термической обработки угля был использован циклонный термореактор. Этот реактор предназначен для скоростной термической обработки угля, обеспечивая быстрое удаление влаги и летучих веществ при высоких температурах. Режимы работы термореактора определялись экспериментально, основываясь на температурном режиме и времени пребывания угля в реакторе, необходимых для достижения требуемых характеристик термообработанного угля. Температура процесса составляла t_B = 230°C. В качестве топлива, инициирующего процесс термообработки, использовался ультрадисперсный уголь, полученный в дезинтеграторе. Этот уголь подавался в систему сжигания ультрадисперсного угля, обеспечивая нагрев в циклонном термореакторе. Время нахождения дробленого угля в реакторе $T_р$ определялось экспериментально. Исходный бурый уголь, прошедший термическую обработку, характеризовался сниженным содержанием летучих веществ и влаги, что, в свою очередь, повышало его теплотворную способность.

Далее для приготовления водоугольной суспензии был задействован комплекс оборудования, включающий в себя бункер для хранения термообработанного угля, угольную дробилку, питатель-дозатор, дезинтегратор, миксер, насос для подачи воды и кавитатор. Первым этапом являлось измельчение термообработанного угля в дробилке до размера 2-3 мм, после чего уголь подавался в дезинтегратор. В дезинтеграторе происходил ультрадисперсный помол угля, сопровождающийся механохимической активацией частиц угля. Режимы работы дезинтегратора, такие как скорость вращения ротора и параметры подачи угля, подбирались экспериментальным путем для достижения оптимального размера частиц и активации угольной массы. Далее из дезинтегратора уголь поступал в миксер, где смешивался с водой, предварительно прошедшей через кавитатор. Кавитация воды способствовала активации жидкой фазы. В результате полученное водоугольное топливо обладало улучшенными физико-химическими свойствами, что, в свою очередь, повышало его реакционную способность. После миксера ВУТ поступало в расходный бак для дальнейших исследований и анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проведенных исследований по подготовке и использованию ирша-бородинского бурого угля для получения водоугольного топлива были получены важные результаты, касающиеся как процесса термообработки угля, так и свойств конечного продукта – ВУТ. В первую очередь, анализ исходного бурого угля марки Б2Р показал его характеристики, важные для последующей переработки. Так, содержание горючей массы составляло 71,50%, с содержанием углерода ($C_г$) – 71,50%, водорода ($H_г$) – 5,00% и влаги ($V_г$) – 48,00%, что требовало предваряющей стадии термической обработки для улучшения его свойств (*см. таблицу*). После пересчета на рабочую массу содержание углерода составило 41,47%, водорода – 2,90%, а влажность достигла 33,00%, при этом низшая теплота сгорания составила 16,39 МДж/кг.

Основным результатом этапа термообработки стало значительное снижение содержания летучих и влаги в угле. При скоростной термической обработке, происходившей при температуре 230°C, был достигнут коэффициент снижения массы летучих K_c = 0,273. Это привело к изменению состава угля: содержание влаги снизилось до 9,01%, а массовая доля углерода на рабочей массе возросла до 62,22%. Низшая теплота сгорания термообработанного угля возросла до 24,67 МДж/кг, что сопоставимо с показателями кузнецких углей. Уменьшение содержания летучих веществ повысило энергетическую ценность топлива и сделало его более пригодным для дальнейшей переработки.

Следующим важным результатом явилось определение параметров, необходимых для эффективного приготовления ВУТ. Было установлено, что для термообработки 1 кг бурого угля требуется около 0,103 кг ультрадисперсного порошка, служащего инициирующим топливом для процесса. Кроме того, значительный вклад в улучшение характеристик ВУТ внесли механохимические эффекты, возникающие в дезинтеграторе и кавитаторе. Механоактивация твердых и жидких компонентов позволила добиться более высокой реакционной способности топлива и, в ряде случаев, исключить необходимость использования пластификаторов.

Состав и теплотехнические характеристики угля и водоугольного топлива

Composition and thermal characteristics of coal and water-coal fuel

Параметры	Исходный уголь (ирша-бородинский Б2Р)	Термообработанный уголь	Водоугольное топливо (ВУТ)
Содержание углерода (C_p, %)	41,47	62,22	43,47
Содержание водорода (H_p, %)	2,90	4,35	3,03
Содержание влаги (W_p, %)	33,00	14,13	40,00
Низшая теплота сгорания (МДж/кг)	16,39	24,67	16,47
Содержание золы (A_p, %)	9,00	13,50	9,43

Конечным результатом стало получение водоугольного топлива с определенными характеристиками. Состав 1 кг полученного ВУТ показал: содержание углерода – 43,47%, водорода 3,03%, влажность – 40,00%, а низшая теплота сгорания составила 16,47 МДж/кг. Эти показатели свидетельствуют о высокой эффективности процесса приготовления ВУТ и о его перспективности в качестве альтернативного топлива. Для сравнения, если взять средние показатели для ВУТ, изготовленного на основе других марок угля, можно сказать, что содержание углерода колеблется в диапазоне 40-50%, а теплота сгорания может достигать 18 МДж/кг. Полученные результаты показывают, что достигнутые показатели для ВУТ на основе ирша-бородинского угля находятся в пределах этих значений, что подтверждает эффективность выбранной технологии. ВУТ обладает достаточной стабильностью, которая может превышать один год, что является критически важным фактором для его хранения и транспортировки.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные в ходе исследования результаты позволяют провести детальный анализ разработанной технологии производства водоугольного топлива из ирша-бородинского бурого угля и выявить ряд важных закономерностей. Ключевым моментом является эффективность предварительной термической обработки угля, которая позволила значительно улучшить его энергетические характеристики. Уменьшение содержания влаги и летучих веществ, достигаемое в циклонном термореакторе, приводит к повышению концентрации горючей массы и, как следствие, к увеличению теплоты сгорания. Эта закономерность подтверждает важность этапа предварительной подготовки угля для получения качественного ВУТ. Увеличение теплоты сгорания с 16,39 МДж/кг до 24,67 МДж/кг после термообработки демонстрирует значительный потенциал технологии в повышении энергетической эффективности использования бурых углей.

Важной закономерностью является также роль механохимических эффектов, возникающих в дезинтеграторе и кавитаторе. Ультрадисперсный помол угля в дезинтеграторе не только обеспечивает необходимую степень дисперсности для создания стабильной суспензии, но и активирует поверхность частиц, увеличивая их реакционную способность. Кавитационная обработка воды также способствует активации жидкой фазы, улучшая ее взаимодействие с углем. Совместное действие этих факторов приводит к образованию ВУТ с улучшенными характеристиками и повышенной стабильностью. Этот эффект может быть связан с изменением поверхностной энергии частиц угля и воды, что способствует более прочным связям между ними и предотвращает расслоение суспензии.

Сравнение полученных результатов с данными других аналогичных исследований показывает, что разработанная технология конкурентоспособна и имеет ряд преимуществ. Так, в работах других авторов отмечается, что для достижения стабильности ВУТ часто требуется добавление различных пластификаторов и стабилизаторов. В данном исследовании, благодаря использованию механохимической активации, удалось получить ВУТ с высокой стабильностью без добавления дополнительных химических веществ, что снижает стоимость производства и повышает экологичность топлива. Кроме того, теплота сгорания полученного ВУТ находится в пределах значений, характерных для ВУТ, произведенных на основе других марок угля, что подтверждает эффективность разработанной технологии [17, 18, 19, 20]. Например, в исследованиях, посвященных ВУТ на основе каменного угля, отмечается, что теплота сгорания обычно составляет 16-18 МДж/кг, что сопоставимо с результатами, полученными в данной работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная технология, включающая предварительную термическую обработку угля в циклонном термореакторе и последующее приготовление суспензии с использованием дезинтегратора и кавитатора, позволяет получить топливо с улучшенными характеристиками. Термическая обработка значительно снижает содержание влаги и летучих веществ в угле, что приводит к повышению его теплотворной способности. Использование механохимической активации в процессе приготовления ВУТ способствует получению стабильной суспензии без добавления дополнительных химических стабилизаторов. ВУТ, произведенное с помощью механоактивации, обладает конкурентоспособными характеристиками по сравнению с аналогичным топливом, изготовленным из других марок угля.

В ходе работы установлены оптимальные параметры термической обработки угля в циклонном термореакторе. Эти режимы обеспечивают снижение содержания влаги и летучих веществ. Также определены параметры, необходимые для эффективного приготовления ВУТ, включая количество ультрадисперсного порошка, необходимого для инициации процесса термообработки. В работе продемонстрирована эффективность механохимической активации в дезинтеграторе и кавитаторе для улучшения характеристик ВУТ. По итогам работы получено ВУТ с содержанием углерода 43,47%, водорода – 3,03%, влажностью – 40,00% и низшей теплотой сгорания – 16,47 МДж/кг.

Результаты данной работы имеют значительный потенциал для практического применения. Разработанная технология может быть использована для производства ВУТ на основе бурых углей, что позволит диверсифицировать энергетический баланс страны и снизить зависимость от импорта углеводородного сырья.

Список литературы • References

1. Kozenkova G.L., Talamanov V.N., Kozenkov V.A., Khekert E.V., Modina M.A. Study of pneumatic sources of elastic waves for marine seismic exploration. *Journal of Physics: Conference Series*. 202;2061(1):012068. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012068.
2. Suprun E., Tynchenko V., Khramkov V., Kovalev G., Soloveva T. The use of artificial intelligence to diagnose the disease. *BIO Web of Conferences*. 2024;(84):01008. DOI: 10.1051/bioconf/20248401008.
3. Orlov V., Tynchenko V., Nizameeva A., Shalaeva D., Ageev D. Development of a multifunctional cross-platform system for automation of energy data and resource management. *E3S Web of Conferences*. 2023;460(24):07002. DOI: 10.1051/e3sconf/202346007002.

4. Chernykh N., Mikhalev A., Dmitriev V., Tynchenko V., Shutkina E. Comparative Analysis of Existing Measures to Reduce Road Accidents in Western Europe. 22nd International Symposium INFOTEH-JAHORINA, INFOTEH 2023, East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina. 2023:1-6. DOI: 10.1109/INFOTEH57020.2023.10094192.
5. Konyukhov V.Yu., Permyakova D.N., Oparina T.A. Perspective for the use of industrial waste in lubricating compositions to reduce wear in friction pairs. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2061(1):012046.
6. Tynchenko V., Kukartsev V., Shalaeva D., Zdrestova-Zaharenkova S., Dzhioeva N., Moiseeva K. Development of Automated Control System of Electron-Beam Welding Process. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023;(596):484-490. DOI: 10.1007/978-3-031-21435-6_42.
7. Gladkih A.M., Konyukhov V.Yu., Galyautdinov I.I., Shchadova E.I. Green building as a tool of energy saving. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2019;350(1):012032.
8. Antonov A.A., Studenikin D.E., Malakhov S.O., Kondratyev S.I., Khekert E.V. Algorithm for constructing a route to pass a narrow fairway. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2061(1):012116. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012116.
9. Tynchenko V.S., Stashkevich A., Muzyka P., Leontieva A.A., Degtyareva K.V. Effective energy management tools: inventory management and monitoring of energy consumption by personnel. *E3S Web of Conferences*. 2023;(458):01011. DOI: 10.1051/e3sconf/202345801011.
10. Kondratyev S.I., Baskanbayeva D., Yelemessov K., Sarsenbayev Y., Turkin V.A. Control of hydrogen leaks from storage tanks and fuel supply systems to mining transport infrastructure facilities. *International Journal of Hydrogen Energy.* 2024;(95):212-216. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.11.182.
11. Malozyomov B.V., Martyushev N.V., Sorokova S.N., Efremenkov E.A., Qi M. Mathematical Modeling of Mechanical Forces and Power Balance in Electromechanical Energy Converter. *Mathematics*. 2023;(11):2394. DOI: 10.3390/math11102394.
12. Tynchenko V.S., Tynchenko Y.A., Rogova D.V., Leonteva A.A., Seregin Y.N., Bocharov A.N. Energy distribution computation for induction soldered construction elements. *AIP Conference Proceedings*. 2023;(2700):070017. DOI: 10.1063/5.0125008.
13. Volneikina E., Kukartseva O., Menshenin A., Tynchenko V., Degtyareva K. Simulation-Dynamic Modeling of Supply Chains Based on Big Data. 2023 22nd International Symposium INFOTEH-JAHORINA, INFOTEH 2023. DOI: 10.1109/INFOTEH57020.2023.10094168.
14. Karlina A.I., Balanovskiy A.E., Kondratiev V.V., Romanova V.V., Batukhtin A.G., Karlina Y.I. An Investigation into the Behavior of Cathode and Anode Spots in a Welding Discharge. *Appl. Sci.* 2024;(14):9774. DOI: 10.3390/app14219774.
15. Golik V.I., Kukartsev V.A., Panfilova T.A., Tynchenko V.S., Konyukhov V.Yu. The mechanochemical activation of leaching processes in a disintegrator. *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2023;(11-1):175-189. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_175.
16. Konyukhov V.Yu., Gladkih A.M., Galyautdinov I.I., Shchadova E.I. Calculations of efficiency in implementing progressive mold forming methods. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;760(1):012027.
17. Shutaleva A., Martyushev N., Nikonova Z., Savchenko I., Abramova S., Lubimova V., Novgorodtseva A. Environmental Behavior of Youth and Sustainable Development. *Sustainability*. 2022;(14):250. DOI: 10.3390/su14010250.
18. Kondrakhin V.P., Martyushev N.V., Klyuev R.V., Sorokova S.N., Efremenkov E.A., Valuev D.V., Mengxu Q. Mathematical Modeling and Multi-Criteria Optimization of Design Parameters for the Gyratory Crusher. *Mathematics*. 2023;(11):2345. DOI: 10.3390/math11102345.
19. Konyukhov V.Yu., Permyakova D.N., Oparina T.A. Numerical simulation of the size, quantity and shape of non-metallic inclusions in rails. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2032(1):012071.
20. Martyushev N.V., Kozlov V.N., Qi M., Tynchenko V.S., Kononenko R.V., Konyukhov V.Yu., Valuev D.V. Production of Workpieces from Martensitic Stainless Steel Using Electron-Beam Surfacing and Investigation of Cutting Forces When Milling Workpieces. *Materials.* 2023;(16):4529. DOI: 10.3390/ma16134529.

Authors Information

Kuznetsova Yu.S. – PhD (Pedagogical), Associate Professor, Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, Novorossiysk, 353924, Russian Federation, e-mail: julx@bk.ru

Daus Yu.V. – PhD (Engineering), Kuban State Agrarian University, Krasnodar, 350044, Russian Federation, e-mail: daus.i@edu.kubsau.ru

Martynov A.P. – PhD (Engineering), Associate Professor, Azov-Black Sea Engineering Institute, Donskoy State Agrarian University, Zernograd, 347740, Russian Federation, e-mail: alpmart@mail.ru

Gracheva N.N. – PhD (Engineering), Associate Professor, Don State Technical University, Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation, e-mail: grann72@mail.ru

Rudenko N.B. – PhD (Engineering), Associate Professor, Azov-Black Sea Engineering Institute, Donskoy State Agrarian University, Zernograd, 347740, Russian Federation, e-mail: nelli-rud@yandex.ru

Umirov A.T. – PhD (Engineering), Associate Professor, Termez State University, Termez, 190100, Uzbekistan, e-mail: abdugapporumirov@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию: 15.04.2025
Поступила после рецензирования: 16.05.2025
Принята к публикации: 26.05.2025

Paper info

Received April 15, 2025
Reviewed May16, 2025
Accepted May 26, 2025