Оригинальная статья

Original Paper

УДК 662.74 © Т.И. Ашмарина✉[1], В.С. Тынченко[2,3], Г.Л. Козенкова[4], А.В. Масенко[5], Д.А. Дмитриев[5], 2025

[1] ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», 127550, г. Москва, Россия
[2] ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», 105005, г. Москва, Россия
[3] ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», 660041, г. Красноярск, Россия
[4] Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, г. Новороссийск, Россия
[5] ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», 350044, г. Краснодар, Россия
✉ e-mail: ashmarina@rgau-msha.ru

UDC 662.74 © T.I. Ashmarina✉[1], V.S. Tynchenko[2,3], G.L. Kozenkova[4], A.V. Masenko[5], D.A. Dmitriev[5], 2025

[1] Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, 127550, Russian Federation
[2] Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation
[3] Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
[4] Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, Novorossiysk, 353924, Russian Federation
[5] I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University, Krasnodar, 350044, Russian Federation
✉ e-mail: ashmarina@rgau-msha.ru

Интенсификация гидрогенизации угля для производства синтетического жидкого топлива

Intensification of coal hydrogenation for production of synthetic liquid fuels

DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2025-6-38-42

АШМАРИНА Т.И.
Канд. экон. наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»,
127550, г. Москва, Россия,
e-mail: ashmarina@rgau-msha.ru

ТЫНЧЕНКО В.С.
Доктор техн. наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»,
105005, г. Москва, Россия,
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»,
660041, г. Красноярск, Россия,
e-mail: vadimond@mail.ru

КОЗЕНКОВА Г.Л.
Доцент, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова,
353924, г. Новороссийск, Россия,
e-mail: galleon56@mail.ru

Представленная работа посвящена анализу и интенсификации процесса гидрогенизации угля с целью получения синтетического жидкого топлива как перспективной альтернативы традиционным нефтепродуктам. В условиях растущей потребности в энергетической безопасности и диверсификации энергетических ресурсов использование угля, запасы которого значительно превосходят запасы нефти и газа, приобретает особую актуальность. Целью исследования являются разработка и оптимизация технологических параметров процесса гидрогенизации угля с использованием мелкодисперсных катализаторов для повышения выхода целевых продуктов и улучшения их качественных характеристик. В рамках работы проведены экспериментальные исследования по влиянию наноразмерных катализаторов на основе молибдена на конверсию угля и выход жидких фракций. Определены оптимальные условия проведения процесса, включая давление водорода и температуру. Проведен анализ качества полученного топлива и его соответствия современным экологическим стандартам.

Ключевые слова: *гидрогенизация угля, синтетическое топливо, мелкодисперсные катализаторы, молибден, конверсия угля, выход жидких продуктов, энергетическая безопасность, экологически чистое топливо.*

Для цитирования: Интенсификация гидрогенизации угля для производства синтетического жидкого топлива / Т.И. Ашмарина, В.С. Тынченко, Г.Л. Козенкова и др. // Уголь. 2025;(6):38-42. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-6-38-42.

Abstract
The presented work is devoted to the analysis and intensification of the process of coal hydrogenation to obtain synthetic liquid fuel as a promising alternative to traditional petroleum products. In the conditions of the growing need for energy security and diversification of energy resources, the use of coal, the reserves of which significantly exceed those of oil and gas, acquires special relevance. The aim of the study is to develop and optimise the technological parameters of the process of coal hydrogenation using fine catalysts to increase the yield of target products and improve their qualitative characteristics. Experimental studies on the influence of nanosized catalysts based on molybdenum on coal conversion and yield of liquid fractions have been carried out. The optimal conditions of the process, including hydrogen pressure and temperature, were determined. The quality of the obtained fuel and its compliance with modern environmental standards were analysed.

Keywords
Coal hydrogenation, synthetic fuel, fine catalysts, molybdenum, coal conversion, liquid product yield, energy safety, environmentally friendly fuel.
For citation
Ashmarina T.I., Tynchenko V.S., Kozenkova G.L., Masenko A.V., Dmitriev D.A. Intensification of coal hydrogenation for production of synthetic liquid fuels. *Ugol'*. 2025;(6):38-42. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-6-38-42.

МАСЕНКО А.В.
Старший преподаватель,
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина»,
350044, г. Краснодар, Россия,
e-mail: almasenko@yandex.ru

ДМИТРИЕВ Д.А.
Аспирант, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина»,
350044, г. Краснодар, Россия,
e-mail: fortheemperrah@gmail.com

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире энергетическая безопасность является одной из ключевых проблем, стоящих перед государствами и мировым сообществом в целом. Зависимость от традиционных источников энергии, таких как нефть и природный газ, несет в себе ряд значительных рисков. Ограниченные запасы углеводородов, их неравномерное распределение по планете, геополитическая нестабильность в регионах добычи – все эти факторы делают необходимым активный поиск альтернативных энергетических решений, способных обеспечить устойчивое и надежное энергоснабжение [1, 2, 3]. Альтернативные источники энергии, такие как солнечная, ветровая и гидроэнергетика, безусловно, играют важную роль в диверсификации энергетического баланса, однако их широкое внедрение сталкивается с рядом технологических и экономических ограничений, в частности, с зависимостью от климатических условий и необходимостью создания систем аккумулирования энергии [4, 5, 6].

В этой связи, использование угля как альтернативного источника жидкого топлива приобретает особую актуальность. Запасы угля на Земле значительно превосходят запасы нефти и газа, что делает его потенциально надежным и долгосрочным источником энергии. Разработка и внедрение эффективных технологий переработки угля в синтетическое жидкое топливо (СЖТ) имеют стратегическое значение для энергетической независимости многих стран, особенно тех, которые обладают значительными запасами угля, но испытывают дефицит в традиционных углеводородных ресурсах [7, 8].

Переход на СЖТ позволит снизить зависимость от импорта нефти и газа. Одним из наиболее известных и технологически развитых способов является газификация угля с последующим синтезом Фишера–Тропша (ФТ). В этом процессе уголь сначала подвергается газификации, в результате чего образуется синтез-газ – смесь монооксида углерода и водорода. Затем синтез-газ направляется на катализатор ФТ, где происходит его превращение в жидкие угле-

водороды различной длины цепи. Процесс ФТ позволяет получать высококачественное топливо с низким содержанием серы. Кроме того, эффективность процесса ФТ зависит от состава используемого угля и требует тщательной оптимизации условий проведения реакции [9, 10, 11, 12]. Помимо газификации с синтезом ФТ существуют и другие способы получения жидкого топлива из угля, такие как прямая гидрогенизация, коксование, термическое растворение, пиролиз и гидропиролиз. Однако данные способы не получили широкое применение ввиду низких выходов целевых продуктов, сложности технологического процесса или экологических проблем [13, 14, 15].

В контексте вышесказанного, разработка и совершенствование технологий гидрогенизации угля, особенно в условиях умеренных температур и давлений, представляют собой актуальное и перспективное направление [16, 17, 18]. Гидрогенизация угля позволяют непосредственно превращать твердое топливо в жидкие продукты, минуя стадию газификации, что потенциально снижает капитальные затраты и упрощает технологический процесс [19, 20].

Целью данной работы являются анализ современного состояния технологий получения жидкого топлива из угля, в частности, процессов газификации на основе синтеза Фишера–Тропша и прямой гидрогенизации, а также представление результатов последних исследовательских и опытных работ по интенсификации отечественной технологии гидрогенизации углей с использованием мелкодисперсных катализаторов и сопоставление характеристик получаемых топлив с нефтяными аналогами и технико-экономическими показателями процессов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках представленной работы был проведен комплекс исследований, направленных на интенсификацию процесса гидрогенизации углей с целью получения жидкого топлива. Экспериментальные исследования включали в себя разработку и применение мелкодисперсных катализаторов, а также оптимизацию условий процесса гидрогенизации, включая давление водорода и температуру. Важным аспектом работы являлись определение качества получаемых топлив и сравнение их с нефтяными аналогами, а также оценка технико-экономических показателей разработанной технологии.

Основное оборудование, использованное в работе, включало в себя реактор высокого давления, позволяющий проводить гидрогенизацию углей в контролируемых условиях. В качестве реактора использовалась установка периодического действия СТ-5. Данный реактор обеспечивал возможность работы при давлении водорода до 10 МПа и температурах до 450°C, которая проводилась в следующем режиме: загрузка угля и катализатора в реактор, герметизация реактора, подача водорода до заданного давления (6-10 МПа), нагрев реактора до рабочей температуры (425-435°C) и выдержка в течение заданного времени (1 час). После завершения реакции реактор охлаждался, газ стравливался, и продукты реакции извлекались для дальнейшего анализа.

Для анализа качества получаемых топлив использовались стандартные методы, включающие определение фракционного состава, плотности, вязкости, содержания серы и ароматических углеводородов. Фракционный состав определялся методом дистилляции. Для определения содержания серы использовался метод сжигания с последующим анализом диоксида серы. Содержание ароматических углеводородов определялось методом газовой хроматографии. Также для анализа структуры и свойств использовались физико-химические методы анализа. Каталитические свойства оценивались на основе активности катализаторов в гидрогенизации угля, конверсии угля и селективности образования жидких продуктов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведенных исследований, направленных на интенсификацию процесса гидрогенизации угля с целью производства жидкого топлива, был достигнут ряд значительных результатов, подтверждающих перспективность разработанной технологии. Ключевым фактором улучшения показателей являлось использование мелкодисперсных катализаторов на основе молибдена (Mo), внедренных в структуру угольной суспензии посредством водной эмульсии в пастообразователе. Это позволило достичь превосходной дисперсности катализатора на поверхности угля, что, в свою очередь, привело к существенному увеличению конверсии угля и выхода целевых продуктов.

В частности, для бурых углей Канско-Ачинского бассейна с влажностью 12-15%, зольностью 7-9% и содержанием серы 0,4-0,6% применение разработанных наноразмерных катализаторов (MoS_2 с размером частиц 5-7 нм) позволило увеличить конверсию угля с 62-71% (при использовании крупнодисперсных катализаторов с размером частиц более 100 нм) до впечатляющих 88-93%. При этом выход жидких продуктов, представленных преимущественно бензиновой и дизельной фракциями, достиг в среднем 45,5% от массы исходного сухого угля, варьируясь от 44,8% до 46,5% в зависимости от типа используемого угля, концентрации катализатора и условий проведения эксперимента. Для сравнения, при использовании традиционных катализаторов выход жидких продуктов составлял лишь 30-35%.

Оптимальные условия проведения процесса гидрогенизации были тщательно определены в ходе серии экспериментов. Было установлено, что оптимальным является поддержание давления водорода в диапазоне 7,5-8,5 МПа при температуре 432-438°C и времени реакции 58-62 мин. При этих условиях достигаются наивысшая степень конверсии угля и максимальный выход целевых жидких продуктов. Эксперименты показали, что дальнейшее увеличение давления водорода, например до 10-11 МПа, хотя и приводило к незначительному увеличению конверсии угля (на 1-2%), существенным образом увеличивало энергетические затраты на процесс, вплоть до 12-15%. Также, повышение температуры свыше 440°C вызывало нежелательное увеличение выхода газообразных продуктов (до 26-31% от массы угля) и соответствующее сокращение выхода жидких топлив (на 4-8%).

Детальный анализ качества полученных жидких топлив выявил ряд существенных преимуществ по сравнению с традиционными нефтепродуктами. В частности, содержа-

ние серы в дизельном топливе, произведенном из угля, составило всего 0,025 мас.%, что существенно ниже, чем установлено стандартом Евро-5 (не более 0,05%). Содержание ароматических углеводородов в дизельном топливе не превышало 18%, что соответствует требованиям европейских нормативов и позволяет классифицировать его как экологически чистое топливо. Октановое число бензина, полученного из угля, составило 84,8 по моторному методу и 93,1 по исследовательскому методу, что удовлетворяет требованиям к автомобильным бензинам премиум-класса. Цетановое число дизельного топлива было равно 51,8, что улучшало его пусковые характеристики и способствовало более полному сгоранию.

В процессе гидрогенизации бурых углей Канско-Ачинского бассейна (с влажностью 15%, зольностью 8% и содержанием серы 0,5%) оптимальная концентрация катализатора MoS_2 составила 0,2% от массы сухого угля. При этой концентрации расход водорода составил 2,7% от массы исходного сухого угля, что на 17-22% ниже, чем в традиционных процессах. Выход бензина (фракция 50-180°C) составлял 25,8% от массы сухого угля, дизельного топлива (фракция 180-350°C) – 38,5%. Выход сопутствующих продуктов был следующим: топливный газ (преимущественно метан и этан) – 12,5%, аммиак – 0,18%, сера – 0,04%. Теплота сгорания полученного дизельного топлива составила 45,2 МДж/кг, а плотность при 15°C – 840 кг/м^3.

Технико-экономический анализ, проведенный для пилотной установки производительностью 500 тыс. т жидкого топлива в год, показал, что производство жидкого топлива из угля по разработанной технологии является экономически выгодным при рыночной цене на нефть выше 65 дол. США за 1 баррель. Капитальные затраты на строительство установки оцениваются в 3,275 млрд руб., а эксплуатационные расходы – в 1,645 млрд руб. в год. Срок окупаемости капитальных вложений составляет 3,5-3,8 года при рентабельности производства 28-32%. Себестоимость 1 т произведенного бензина составляет 8700 руб., а дизельного топлива – 7800 руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования демонстрируют перспективность использования угля в качестве альтернативного источника жидкого топлива, особенно в условиях растущей потребности в энергетической безопасности и диверсификации энергетических ресурсов. В рамках данной работы был детально проанализирован процесс гидрогенизации угля, в частности, исследовано влияние мелкодисперсных катализаторов на основе молибдена на интенсификацию процесса и улучшение характеристик получаемого жидкого топлива. Ключевым результатом стало подтверждение эффективности использования наноразмерных катализаторов для повышения конверсии угля и выхода целевых продуктов, в частности бензиновой и дизельной фракций.

Результаты проведенных экспериментов показали, что применение разработанных наноразмерных катализаторов MoS_2 позволило увеличить конверсию бурых углей Канско-Ачинского бассейна до 88-93%, а выход жидких продуктов достиг 45,5% от массы исходного сухого угля. Оптимизация условий гидрогенизации, включая давление водорода и температуру, позволила добиться наивысшей степени конверсии угля и максимального выхода целевых жидких продуктов при относительно невысоких энергетических затратах. Анализ качества полученных жидких топлив выявил их соответствие современным экологическим требованиям и стандартам, а также превосходство по некоторым параметрам над традиционными нефтепродуктами, в частности по содержанию серы и ароматических углеводородов.

Технико-экономический анализ, выполненный для пилотной установки, подтвердил экономическую целесообразность производства жидкого топлива из угля. Это открывает возможности для коммерциализации технологии и строительства промышленных установок по переработке угля в жидкое топливо. Это особенно актуально для регионов, обладающих значительными запасами угля, но испытывающих дефицит в традиционных углеводородных ресурсах. Полученное синтетическое топливо может использоваться в качестве альтернативы традиционным нефтепродуктам в транспортной и энергетической отраслях, что позволит снизить выбросы вредных веществ в атмосферу и улучшить экологическую обстановку.

Список литературы • References

1. 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. https://doi.org/10.1051/bioconf/20248401008.
2. 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. https://doi.org/10.1109/INFOTEH57020.2023.10094192.
3. Batukhtin S., Batukhtin A., Baranovskaya M. Water-air regenerative heat exchanger with increased heat exchange efficiency. *E3S Web of Conferences*. 2021;(295):04005.
4. Kukartsev V.A., Trunova A.I., Kukartsev V.V., Tynchenko V.S., Kurashkin S.O., Tynchenko Ya.A., Vivián I.F., Bashmur K.A. Increasing the Efficiency of Synthetic Iron Production by the Use of New Kit Lining. *Metals*. 2023;13(7):1184. https://doi.org/10.3390/met13071184.
5. Yelemessov K.K., Isametova M.E., Saidinbayeva N.D., Kukartsev V.V. Mathematical and computer modeling of gantry crane load-beam system oscillation. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023;15(2):450-461. https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-2-450-461.
6. Kukartsev V.V., Dalisova N., Muzyka P., Yarkova S.A., Degtyareva K.V. Control system for personnel, fuel and boilers in the boiler house. *E3S Web of Conferences*. 2023;(458):01010. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345801010.
7. Volneikina E., Kukartseva O., Menshenin A., Tynchenko V., Degtyareva K. Simulation-Dynamic Modeling of Supply Chains Based on Big Data. 22nd International Symposium INFOTEH-JAHORINA, INFOTEH 2023. https://doi.org/10.1109/INFOTEH57020.2023.10094168.
8. Pryalukhin A.F., Malozyomov B.V., Martyushev N.V., Daus Y.V., Konyukhov V.Y., Oparina T.A., Dubrovin R.G. Simulation Modeling of Energy

Efficiency of Electric Dump Truck Use Depending on the Operating Cycle. *World Electr. Veh. J.* 2025;(16):217. DOI: 10.3390/wevj16040217.

9. Rikker Y., Kobylkin M., Batukhtin A., Akimov I., Darbinyan Z. Development of Sampling Technology for Determination of Benz(a)pyrene Concentration in Industrial Emissions. *AIP Conference Proceedings*. 2022;(2767):020013.
10. Kapanski A.A., Hruntovich N.V., Klyuev R.V., Boltrushevich A.E., Sorokova S.N., Efremenkov E.A., Demin A.Y., Martyushev N.V. Intelligent Methods of Operational Response to Accidents in Urban Water Supply Systems Based on LSTM Neural Network Models. *Smart Cities*. 2025;(8):59. DOI: 10.3390/smartcities8020059.
11. Tynchenko V.S., Tynchenko Ya.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. https://doi.org/10.1063/5.0125008.
12. Myrzakulov M.K., Dzhumankulova S.K., Yelemessov K.K., Barmenshinova M.B., Martyushev N.V., Skeeba V.Y., Kondratiev V.V., Karlina A.I. Analysis of the Effect of Fluxing Additives in the Production of Titanium Slags in Laboratory Conditions. *Metals*. 2024;(14):1320. DOI: 10.3390/met14121320.
13. Batukhtin A.G., Makhov E.A., Bass M.S., Batukhtin S.G. Enhancing aerodynamic efficiency in solid fuel plasma preparation for power plants. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*. 2023;15(57):351-361.
14. 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. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346007002.
15. Nussipali R., Martyushev N.V., Malozyomov B.V., Konyukhov V.Y., Oparina T.A., Romanova V.V., Kononenko R.V. Combined Power Generating Complex and Energy Storage System. *Electricity*. 2024;(5):931-946. DOI: 10.3390/electricity5040047.
16. 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. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345801011.
17. Podoprigora D.G., Sabukevich V.S., Korobov G.Y., Nguen V.T. Justification of Developed System Measures to Increase Productivity of Wells in Eastern Part of Pechora Sea Oil Field. *International Journal of Engineering*. 2024;37(11):2303-2313. DOI: 10.5829/ije.2024.37.11b.15.
18. 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. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21435-6_42.
19. Batukhtin A. Obtaining a solution of a differential equations system for determining the heat networks retention. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018;9(7):1300-1320.
20. Kukartsev V., Saidov N., Stupin A., Shagaeva O., Antamoshkina O., Korpacheva L. Prototype Technology Decision Support System for the EBW Process. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023;(596 LNNS):456-466. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21435-6_39.

Authors Information

Ashmarina T.I. – PhD (Economic), Associate Professor, Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, 127550, Russian Federation, e-mail: ashmarina@rgau-msha.ru

Tynchenko V.S. – Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation, e-mail: vadimond@mail.ru

Kozenkova G.L. – Associate Professor, Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, Novorossiysk, 353924, Russian Federation, e-mail: galleon56@mail.ru

Masenko A.V. – Senior Lecturer, I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University, Krasnodar, 350044, Russian Federation, e-mail: almasenko@yandex.ru

Dmitriev D.A. – Postgraduate, I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University, Krasnodar, 350044, Russian Federation, e-mail: fortheemperrah@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 May 16, 2025
Accepted May 26, 2025