

Theoretical and Applied Heating Engineering
Теоретическая и прикладная теплотехника

EDN: ZIGAGQ

УДК 621.311.22.002.5:621.182.2–6

**Process Approaches to Utilization
of Domestic Low-Grade Fuels
for Power Generation**

**Elena S. Vorontsova, Aleksandr Yu. Dolgikh,
Alexander S. Zavorin and Konstantin V. Buvakov***
*Tomsk Polytechnic University
Tomsk, Russian Federation*

Received 01.03.2023, received in revised form 21.06.2023, accepted 03.07.2023

Abstract. Utilization of domestic fuel resources is one of the ways that are being discussed and defined in the guiding documents to increase the energy security and formation of economically feasible fuel and energy balances in the Russian Federation regions. For the territories possessing occurrences of lignite, this type of fossil fuel is of primary importance under the favorable conditions.

Based on the example of Talovskoye deposit in Tomsk region, the technically viable options of low-grade fuels utilization at the regional thermal power plants were considered, as well as at the industrial and municipal power facilities. A high-priority implication for implementing all options, including burning of domestic coal fuel just-in-time, in combination with the basic fuel, supplied to the region together with thermal processing products and other, the absence or minimization of costs for modernization of the operating main and auxiliary equipment is adopted. Limitations, imposed by the utilized fuel properties, are specified for every technology under discussion.

Keywords: fuel and energy balance, domestic fuel, lignite, semi-coke, fuel mixtures, gasification.

Citation: Vorontsova, E. S., Dolgikh, A. Yu., Zavorin, A. S. and Buvakov, K. V. Process approaches to utilization of domestic low-grade fuels for power generation. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2023, 16(5), 524–534. EDN: ZIGAGQ



Технологические подходы к энергетическому использованию местных низкосортных топлив

**Е. С. Воронцова, А. Ю. Долгих,
А. С. Заворин, К. В. Буваков**
*Томский политехнический университет
Российская Федерация, Томск*

Аннотация. Использование местных топливных ресурсов является одним из директивно обозначенных и обсуждаемых путей повышения энергетической безопасности и формирования экономически обоснованных топливно-энергетических балансов регионов Российской Федерации. Для территорий, обладающих локальными проявлениями запасов бурых углей, этот вид ископаемого топлива при наличии благоприятствующих условий имеет преимущественное значение. На примере Таловского месторождения Томской области рассмотрены технически осуществимые варианты вовлечения низкосортных топлив в использование на тепловых электростанциях региона, а также на энергетических объектах промышленного и муниципального назначения. Приоритетным условием реализации всех вариантов, включая сжигание местного угольного топлива «с колёс», в смеси с базовым топливом, поставляемым в регион, в смеси с продуктами термической переработки и др., принято отсутствие или минимизация затрат на реконструкцию действующего основного и вспомогательного оборудования. Для каждой из обсуждаемых технологий обозначены ограничения, которые накладываются свойствами используемого топлива.

Ключевые слова: топливно-энергетический баланс, местное топливо, бурый уголь, полукокс, топливные смеси, газификация.

Цитирование: Воронцова Е. С. Технологические подходы к энергетическому использованию местных низкосортных топлив / Е. С. Воронцова, А. Ю. Долгих, А. С. Заворин, К. В. Буваков // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2023, 16(5). С. 524–534. EDN: ZIGAGQ

Введение

Энергетическая стратегия Российской Федерации применительно к регионам направлена на развитие ресурсоэффективных технологий и обеспечение гарантированной энергобезопасности [1, 2]. При учитывающем эти принципы формировании рационального топливно-энергетического баланса для региона во многих случаях оправданно вовлечение местных топливных ресурсов, если оно позволяет преодолеть или уменьшить дисбаланс размещения центров производства энергетических ресурсов и центров их потребления. Особенно актуальным данное направление является для территорий, удаленных от транспортных коммуникаций, куда доставка высококачественных и освоенных в энергетике топлив становится чрезмерно затратной, и регионов, в топливно-энергетических балансах которых слишком велика доля газового и/или жидкого топлива [2, 3]. Актуальность использования местных низкосортных топливных ресурсов еще более возрастает в кризисное время, когда по тем или иным причинам доступ к высококачественным энергоносителям ограничивается, а их стоимость растет.

Несмотря на природные богатства территорий России и весьма обширное разнообразие местных, особенно твердых топливно-энергетических ресурсов (уголь, торф, древесина, раз-

личные виды биомассы), из всего этого природного и техногенного многообразия в качестве привлекательных и пригодных для удовлетворения нужд всего спектра потребителей (большая и промышленная энергетика, обеспечение частных хозяйств населения, коммунально-бытовые и агропромышленные комплексы) по показателям качества (теплотехническим) в большинстве случаев подходят бурые угли (лигниты) [4, 5].

В России при наличии нескольких крупнейших угольных бассейнов с запасами мирового значения, находящихся в промышленной разработке, имеется немало сравнительно мелких месторождений и малотоннажных залежей угля, который относят к низкосортным топливам местного значения [6, 7]. Как правило, разработка (использование) большинства из них ограничивается экономической целесообразностью, когда себестоимость добычи превысит рыночные цены, что складывается из неблагоприятных геологических и/или географических условий, неразвитости и/или недоступности инфраструктуры и т.д. Однако если при разумном плече доставки имеется необходимая местная инфраструктура, железные и автомобильные дороги, источники электроэнергии, а главное – крупные потенциальные потребители, то вовлечение таких ресурсов в региональный топливно-энергетический баланс может стать реальностью.

Типичным представителем такой категории локальных угольных проявлений служит Таловское месторождение в Томской области, расположенное в 30 км от центральной городской агломерации [8], на примере которого рассмотрен ряд технологически реализуемых способов вовлечения низкосортных углей в энергетическое использование.

Характеристика объекта и цель исследования

Таловское месторождение представлено углем марки Б2 с широким диапазоном изменения балласта в рабочем состоянии: влажность составляет от 29 до 60 %, из которых до 90 % приходится на внешнюю влагу; зольность по керновым пробам – от 8 до 57 %. Состав сухой беззольной или горючей массы [9]: выход летучих веществ – от 58 до 71 %; содержание углерода – от 50,9 до 79,4 %; содержание водорода – от 1,2 до 7,3 %; содержание серы – от 0,1 до 2,0 %; содержание азота – от 0,5 до 3,0 %; содержание кислорода – от 13,1 до 40,4 %. В соответствии с таким элементным составом изменяются значения низшей теплоты сгорания – от 5,0 до 13,5 МДж/кг.

Зола угля имеет выраженный кислый состав бессульфатной массы [10]: содержание оксида кремния – от 46,9 до 59,2 %; содержание оксида алюминия – от 21,2 до 25,3 %; содержание оксида кальция – от 7,1 до 13,0 % и оксида магния – от 1,1 до 1,6 %.

Общие ресурсы месторождения оцениваются более 3,6 млрд т [11]. На участках возможной открытой добычи мощность полого падающих (не более 5 градусов) пластов составляет от 3,8 до 13 м, а глубина залегания от 27 до 80 м при коэффициенте вскрыши менее 6,5 м³/т. Предварительные оценки горно-экономических показателей открытой добычи показывают общий срок эксплуатации углеразреза около 30 лет с годовой производительностью до 7,5 млн т [11].

В разные годы при исследовании месторождения высказывались соображения о принципиальных путях использования типично местного угля. Среди них: сжигание в котельных установках как непосредственно, так и после термической переработки в полукокс, а также газификация. Нарботанный за это время экспериментальный материал в данных направлениях позволяет систематизировать возможные технологические решения, что определило цель настоящей работы.

Сжигание угля «с колес»

Самым простым путем вовлечения местного угля в энергетическое производство представляется непосредственное сжигание без какой-либо реконструкции основного оборудования. Ограничивающим фактором при этом выступает главным образом величина балласта, которая, как показано выше, может охватывать очень широкий диапазон как по зольности, так и по влажности.

Прогнозные оценки влияния минеральной части таловского угля на работу поверхностей нагрева [10], выполненные по методике А. Н. Алехновича с сотрудниками [12], показали, что для обеспечения надежной работы котла на сжигание может подаваться уголь с зольностью сухой массы не более 25 %. Численное моделирование топочных процессов в котле БКЗ-220–100 Ф посредством программного продукта FIRE 3D [13] при сжигании такого угля для всего диапазона встречающейся влажности показало, что при влажности рабочей массы до 25 % в топке создаются условия, по основным параметрам близкие к имеющим место при сжигании кузнецкого угля базовой поставки (рис. 1, 2).

Сжигание угля в смеси

Данное направление связано с реализацией принципиально известных технологий складских операций хранения смешиваемых углей и подготовки угольных смесей. Основным вопросом при этом выступает определение оптимальных соотношений низкосортного угля и базового для электростанции топлива. Подбор этих соотношений относительно легко, в сравнении с трудоемким опытным путем, осуществим на основе численного моделирования процессов в топочной камере. Прогнозируемая таким образом доля таловского угля с влажностью $W^r \leq 25\%$ при сжигании в том же котле составляет от 0,1 до 0,3 (рис. 3).

Здесь стоит заметить, что в действительности оптимальная доля таловского угля в смеси топлива может быть увеличена до 40–50 %. Предпосылкой для этого является наличие

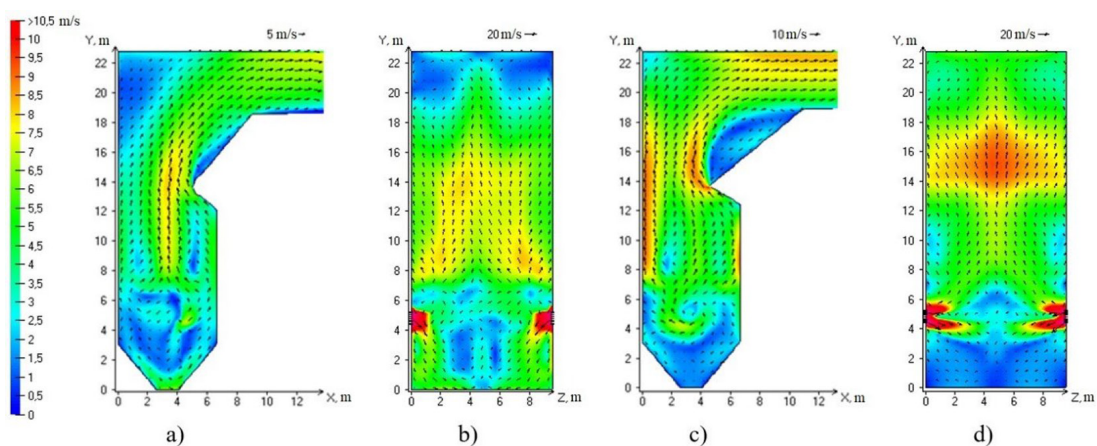


Рис. 1. Аэродинамическая структура топочной среды: а, б – таловский уголь; с, d – кузнецкий уголь; а, с – продольное сечение; б, d – поперечное сечение

Fig. 1. Aerodynamic structure of furnace atmosphere: a, b – Talovsky coal; c, d – Kuznetsky coal; a, c – longitudinal section; b, d – cross section

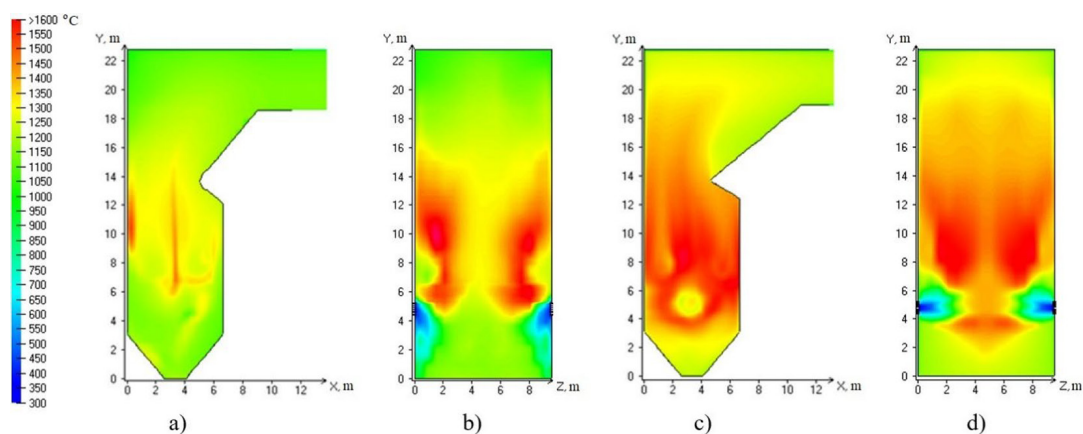


Рис. 2. Распределение температуры в топке котла: а, б – таловский уголь; с, д – кузнецкий уголь; а, с – продольное сечение; б, д – поперечное сечение

Fig. 2. Temperature distribution in the boiler furnace: а, б – Talovsky coal; с, д – Kuznetsky coal; а, с – longitudinal section; б, д – cross section

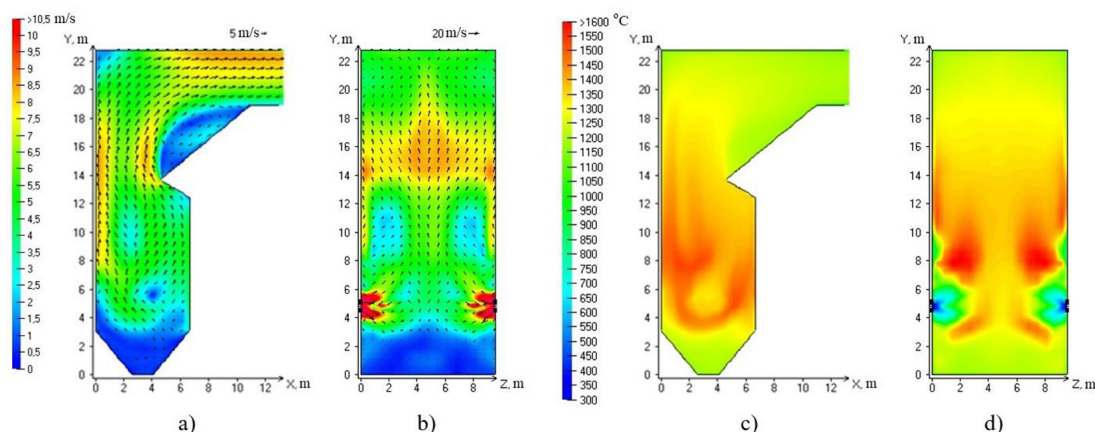


Рис. 3. Аэродинамическая структура (а, б) и распределение температуры (с, д) в топке котла при сжигании смеси таловского и кузнецкого углей (3:7): а, с – продольное сечение; б, д – поперечное сечение

Fig. 3. Aerodynamic structure (а, б) and temperature distribution (с, д) in the boiler furnace when burning Talovsky and Kuznetsky coal mixture (3:7): а, с – longitudinal section; б, д – cross section

подавляющей части содержащейся в таловском угле влаги в форме внешней разновидности, которая быстро удаляется из угля во время пребывания на воздухе.

Термическая переработка угля

Исследования по термической конверсии таловского угля показали его пригодность для получения обогащенного топлива. Например, по технологии, примененной в работе [14], при температуре 300–450 °С под атмосферным давлением и при подаче водяного пара происходит образование полукокса и горючего газа с повышенным содержанием водорода и метана. Если в зону реагирования вводятся присадки с каталитическими свойствами, то выход газа и содержание в нем водорода заметно повышается.

В базовом режиме получается полукокс с низким содержанием летучих в горючей массе (7,1 %), который тем не менее обладает реакционной активностью благодаря развитой пористой структуре. За счет перехода части органического вещества угля в газовую составляющую зольность полукокса возрастает на 10–11 % в сухом состоянии. Для элементного состава сухой беззольной массы при этом характерно абсолютное преобладание углерода (до 94–95 %) при значительном уменьшении содержания водорода (до 0,3 %), кислорода (до 4,7 %), азота (до 0,2 %) и практическом отсутствии серы (следы). Полукокс имеет более высокую теплотворную способность, чем исходный уголь (низшая теплота сгорания рабочей массы составляет до 20,1 МДж/кг), что увеличивает возможности его использования как транспортабельного топлива.

Применение полукокса

Свойства полукокса таловского угля открывают широкий спектр возможных вариантов для его использования в энергетическом производстве. Сосредоточиваясь на региональных условиях продвижения местного топлива, следует отдавать предпочтение тем из них, которые не влекут за собой реконструкции основного и вспомогательного оборудования и не связаны с привлечением иных ресурсов. В связи с этим рассматривать можно сжигание полукокса в качестве самостоятельного топлива, а также в составе смесевых комбинаций.

В первом случае обращает на себя внимание низкое содержание летучих веществ в горючей массе. Очевидно, что для эффективного воспламенения и выгорания пылевидного полукокса при факельном сжигании потребуются как минимум изменение воздушного режима котлов и конструктивных характеристик горелочных устройств, которые могут повлечь за собой необходимость вмешательства в работу системы пылеприготовления котельной установки.

Использование на электростанции полукокса в смеси с исходным таловским углем значительно усложняет этапы подготовки топливных смесей, поскольку с учетом наличия базового для электростанции угля требует отдельного складирования и хранения сразу трех видов твердого топлива, один из которых (таловский уголь) надо считать склонным к самовозгоранию.

Численное моделирование процессов применительно к сжиганию смеси полукокса с кузнецким углем в топке того же котла, что и в других, ранее показанных примерах моделирования, выполнено для всего диапазона доли полукокса в смеси (от 0,1 до 0,9 с шагом 0,1). Установлено, что коксо-угольная смесь значительно изменяет параметры топочной среды. В связи с этим сделан вывод, что количество полукокса таловского угля в смеси с кузнецким углем не должно превышать 30 %. На рис. 4 представлена компьютерная визуализация основополагающих параметров в расчетных сечениях объема топки.

Самостоятельное значение для расширения сферы применения полукокса имеют технологии получения формованного топлива (брикетов и пеллет), пригодного для сжигания в слоевых топках. Размеры этого топлива должны превышать воздушные проемы в колосниковой решетке, что является одним из условий минимизации потерь с провалом.

Одним из вариантов такой технологии была апробирована конверсия таловского угля в процессе пиролиза при температуре не более 450 °С, позволяющей использовать недорогие материалы для изготовления пиролизеров и сократить таким образом капитальные затраты. Из продуктов пиролиза – полукокса и пиролизного конденсата с добавлением к нему

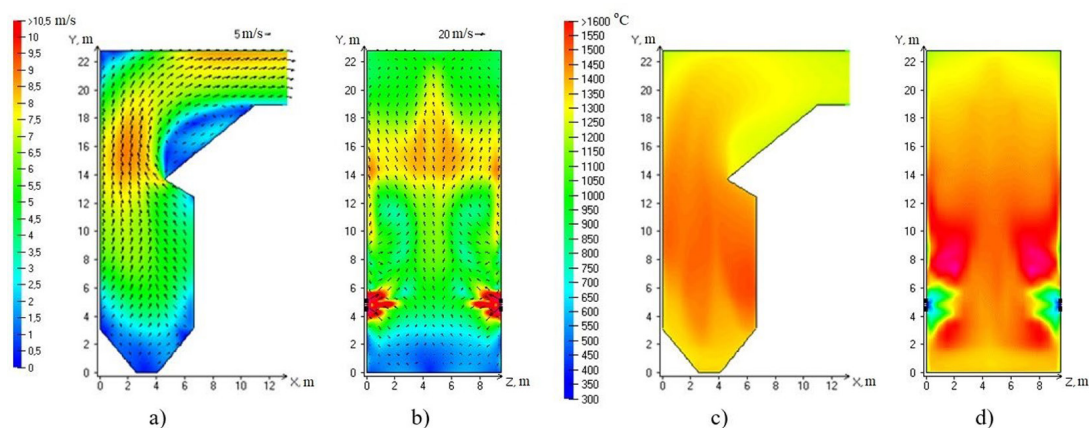


Рис. 4. Аэродинамическая структура (a, b) и распределение температуры (c, d) в топке котла при сжигании смеси полукокса таловского угля и кузнецкого угля (3:7): a, c – продольное сечение; b, d – поперечное сечение

Fig. 4. Aerodynamic structure (a, b) and temperature distribution (c, d) in the boiler furnace when burning the semi-coke mixture of Talovsky and Kuznetsky coals (3:7): a, c – longitudinal section; b, d – cross section

органического связующего – осуществляется формирование нового, композитного топлива. После сушки полученные брикеты (пеллеты) имеют высокую прочность, по данным испытаний согласно ГОСТ, что необходимо для обеспечения их целостности при подаче в слой даже механизированными средствами [15]. Если для данной технологии использовать наименее минерализованную часть углей Таловского месторождения, то реально получать транспортабельное формованное топливо для муниципальных котельных.

Подземная газификация

Вовлечение угля в использование посредством его подземной газификации мало распространено и обычно применимо к месторождениям с угольными пластами малой мощности или со сложными условиями залегания. Известны различные технологические схемы организации процесса. Применительно к Таловскому месторождению рассмотрена схема (рис. 5) с двумя коаксиальными трубами, введенными в пробуренную скважину [16].

Подающая труба 1 служит для подвода нагретой паровоздушной смеси с поверхности к основанию угольного пласта. После прогрева прилегающей к скважине части пласта и начала реагирования угля образовавшиеся газообразные продукты через перфорированную выводящую трубу 2 поступают на поверхность.

Процессы, происходящие в угольном пласте при газификации угля таким способом, исследованы средствами математического моделирования в диапазоне изменения состава и температуры подаваемой паровоздушной смеси [17]. Установлено, что векторы скорости фильтрации продуктов газификации вблизи выходного сечения внутренней трубы оконтуривают границы пространства термических преобразований и направлены к перфорациям внешней трубы. В этой области выделены два фронта реагирования (рис. 6): продвижения пиролиза и продвижения окисления ооксованного массива.

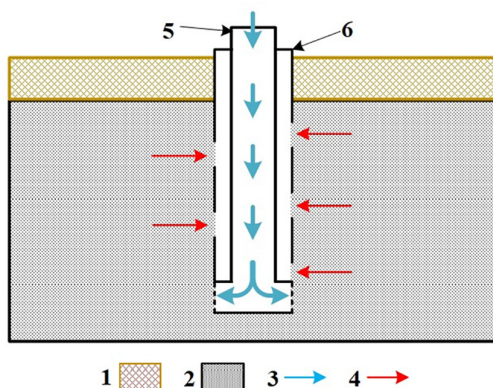


Рис. 5. Схема организации газификации угля с подачей в пласт паровоздушной смеси: 1 – поверхностный слой, 2 – угольный пласт, 3 – пар, 4 – продукты газификации, 5 – внутренняя (подающая) труба, 6 – внешняя (выводящая) труба

Fig. 5. Diagram of coal gasification with supply of air-steam mixture to the seam: 1 – surface layer, 2 – coal seam, 3 – steam, 4 – gasification products, 5 – internal (supply) pipe, 6 – external (outlet) pipe

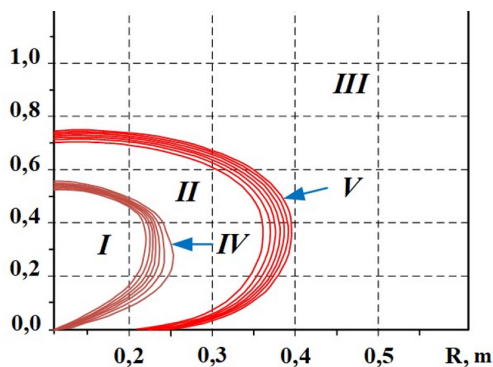


Рис. 6. Структура области конверсии в угольном пласте в фазе начала интенсивной газификации: I – шлак; II – полукокс; III – уголь; IV – граница окисления кокса; V – граница пиролиза угля

Fig. 6. Structure of the conversion area in the coal seam during the phase of intensive gasification beginning: I – slag; II – semi-coke; III – coal; IV – coke oxidation boundary; V – coal pyrolysis boundary

В работе [18] показано, что в случае таловского бурого угля увеличение начальной массовой концентрации кислорода от 0,1 до 0,15 повышает концентрацию горючих компонентов примерно в 1,5 раза, а последующее увеличение концентрации кислорода в подаваемой смеси может приводить к возникновению режима горения. Следствием возрастания температуры в прискважинной области является увеличение массовой концентрации горючих газов в зоне повышенной температуры от 0,45, а на выходе из скважины – до 0,3.

С учетом приведенных результатов представляется, что подземная газификация по данной или подобной технологической схеме может быть привлекательна для обеспечения топливом энергетического производства, расположенного в непосредственной близости к угольному месторождению.

Заключение

На примере бурогоугольного месторождения регионального значения рассмотрены технологически осуществимые варианты включения местного твердого топлива в топливно-энергетический баланс региона с целью повышения его энергетической безопасности. Исходя из условия минимизации или полного исключения затрат на реконструкцию действующего оборудования и вспомогательных систем энергетических предприятий, обозначены рекомендательные ограничения для каждой из рассмотренных технологий, обусловленные свойствами угля.

Список литературы / References

[1] Указ Президента РФ от 13.05.2019 № 216 «Об утверждении Доктрины энергетической безопасности Российской Федерации». *Собрание законодательства РФ*, 20.05.2019, 20, ст. 2421 [Decree of the RF President No. 216 «On Approval of the Doctrine of Energy Security of the Russian Federation» dated May 13, 2019, *Collection of Legislative Acts of the Russian Federation*, 20.05.2019, 20, Art. 2421 (in Rus.)].

[2] Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года». *Собрание законодательства РФ*, 15.06.2020, 24, ст. 3847 [Order of the RF Government No. 1523-р «On Approval of the Energy Strategy of the Russian Federation till 2035» dated June 9, 2020, *Collection of Legislative Acts of the Russian Federation*, 15.06.2020, 24, Art. 3847 (in Rus.)].

[3] Распоряжение Правительства РФ от 13.06.2020 № 1582-р «Об утверждении Долгосрочной программы развития угольной промышленности России на период до 2035 года». *Собрание законодательства РФ*, 22.06.2020, 25, ст. 3963 [Order of the RF Government of the Russian Federation No. 1582-р «On Approval of the Long-Term Program for Coal Industry Development in Russia till 2035» dated June 13, 2020, *Collection of Legislative Acts of the Russian Federation*, 22.06.2020, 25, Art. 3963 (in Rus.)].

[4] Романов С. М. Перспективы развития добычи, переработки и использования бурых углей в России. *Уголь*, 2009, 1(993), 15–17 [Romanov S. M. Development Prospects for Brown Coal Production, Processing and Utilization in Russia, *Russian Coal Journal*, 2009, 1(993), 15–17 (in Rus.)].

[5] Заворин А. С., Тайлашева Т. С., Буваков К. В., Долгих А. Ю., Воронцова Е. С. Топливные ресурсы Томской области для альтернативного энергетического использования. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 2022, 6(333), 55–65 [Zavorin A. S., Taylasheva T. S., Buvakov K. V., Dolgikh A. Yu. & Vorontsova E. S. Fuel resources of Tomsk region for alternative energy usage, *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, 6(333), 55–65 (in Rus.)].

[6] Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году» [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_2020/# – Заглавие с экрана. [State Report «On the Status and Use of Mineral Resources of the Russian Federation in 2020» [Electronic source] – URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_2020/#.

[7] Череповский В.Ф., Быкадоров В.С., Вялов В.И., Волкова И.Б., Волков В.Н., Журбицкий Б.И., Колесник В.Я., Кизильштейн Л.Я., Середин В.В., Файдов Е.Е., Хрусталева Г.К., Хрюкин В.Т. *Угольная база России. Том VI. Основные закономерности углеобразования и размещения угленосности на территории России*. М.: ООО «Геоинформмарк», 2004. 779 с. [Cherepovskiy V.F., Bykadorov V.S., Vyalov V.I., Volkova I.B., Volkov V.N., Zhurbitskiy B.I., Kolesnik V. Ya., Kizil'shteyn L. Ya., Seredin V. V., Faydov E. E., Khrustaleva G. K., Khryukin V. T. *Coal Base of Russia. Volume VI. The basic patterns of carbon formation and distribution of coal-bearing capacity in the territory of Russia*, Moscow, ООО Geoinformmark, 2004, 779 p. (in Rus.)].

[8] Счастливец Е.Л., Навитный А.М. *Угольная база России. Том II. Угольные бассейны и месторождения Западной Сибири (Кузнецкий, Горловский, Западно-Сибирский, бассейны; месторождения Алтайского края и Республики Алтай)*. М.: Геоинформцентр, 2003. 604 с. [Schastlivtsev E. L., Navitnyy A. M. *Coal Base of Russia. Volume II. Coal basins and deposits in Western Siberia (Kuznetsk, Gorlovsky, West Siberian, basins; deposits of the Altai Territory and the Altai Republic)*, Moscow, Geoinformtsentr, 2003, 604 p. (in Rus.)].

[9] Заворин А.С., Карякин С.К., Маслов С.Г., Николаева В.И., Сиразитдинова С.Х., Ласовская О.А. Теплотехнические свойства углей Таловского месторождения Томской области. *Известия Томского политехнического университета*, 2002, 2(305), 131–136 [Zavorin A. S., Karyakin S. K., Maslov S. G., Nikolaeva V. I., Sirazitdinova S. Kh., Lasovskaya O. A. Thermal properties of coals of the Talovsky deposit of the Tomsk region, *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2002, 2(305), 131–136 (in Rus.)].

[10] Казакова О.А., Заворин А.С., Казаков А.В. *Исследование угля Таловского месторождения Томской области*. Томск: STT, 2010. 172 с. [Kazakova O. A., Zavorin A. S., Kazakov A. V. *Study of the Talovsky deposit coal in Tomsk region*, Tomsk, STT, 2010, 172 p. (in Rus.)].

[11] Паровинчак М.С., Смолянинова Н.М. Пути оптимизации топливно-энергетического баланса (ТЭБ) Сибирских регионов на примере Томской области. *Томская горнодобывающая компания. Сборник публикаций к 5-летию ТомГДК. 2001–2005 гг.*, Томск: STT, 2006, 74–80 [Parovinchak M. S., Smolyaninova N. M. Ways to optimize the Fuel and Energy Balance (FEB) in Siberian regions, based on the example of the Tomsk region, *Tomsk mining company. A collection of publications for the 5th anniversary of TomGDK. 2001–2005*, Tomsk, STT, 2006, 74–80 (in Rus.)].

[12] Алехнович А.Н. Шлакование пылеугольных энергетических котлов. *Библиотечка электротехника*, 2013, 8(176), 003–112 [Alekhnovich A. N. Slagging of pulverized coal power boilers, *Library Electrical Engineering*, 2013, 8(176), 003–112 (in Rus.)].

[13] Тайлашева Т.С., Гиль А.В., Воронцова Е.С. Оценка условий сжигания высоковлажного непроектного топлива в камерной топке на основе численного моделирования. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 2016, 1(327), 128–135 [Taylasheva T. S., Gil A. V., Vorontsova E. S. Evaluation of burning conditions of high-humidity non-project fuel in chamber furnace based on numerical simulation, *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, 1(327), 128–135 (in Rus.)].

[14] Казаков А.В., Заворин А.С. *Конверсия некондиционных топлив в низкотемпературном режиме*. Томск: STT, 2011. 255 с. [Kazakov A. V., Zavorin A. S. *Conversion of substandard fuels in the low-temperature conditions*, Tomsk, STT, 2011, 255 p. (in Rus.)].

[15] Табакаев Р.Б., Казаков А.В., Заворин А.С. Твердое композитное топливо из низкосортного сырья (технологический аспект). *Известия Томского политехнического университета*, 2014, 4(325). 56–64 [Tabakaev R.B., Kazakov A.V., Zavorin A.S. Solid composite fuel from low-grade raw (technological aspect), *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, 4(325), 56–64 (in Rus.)].

[16] Заворин А.С., Казаков А.В., Табакаев Р.Б. Способ подземной газификации угля. *Патент РФ № 2490445*. 20.08.2013, 23. 6 с. [Zavorin A.S., Kazakov A.V., Tabakaev R.B. Procedure for underground gasification of coal, *Patent of the Russian Federation no. 2490445*, 20.08.2013, 23. 6 p. (in Rus.)].

[17] Субботин А.Н. *Тепломассоперенос при зажигании и горении структурно неоднородных сред*, автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. Томск, 2011, 32 с. [Subbotin A.N. *Heat and mass transfer during ignition and burning of structurally heterogeneous media*, Thesis ... doctor of phys. and mathem. sci. Tomsk, 2011, 32 p. (in Rus.)].

[18] Субботин А.Н., Кулеш Р.Н., Мазаник А.С. Математическое моделирование тепломассопереноса при подземной газификации угля. *Известия Томского политехнического университета*, 2014, 4(325), 25–32 [Subbotin A.N., Kulesh R.N., Mazanik A.S. Mathematical modeling of heat and mass transfer at underground coal gasification, *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, 4(325), 25–32 (in Rus.)].