

УДК 621.311
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4377
Шифр специальности ВАК: 1.3.14

Обзор современных методов сушки углей с оценкой их эффективности

В.В. Саломатов^{1,2}, В.А. Карелин^{1,2}✉

¹ Новосибирский государственный университет, Россия, г. Новосибирск

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия, г. Новосибирск

✉ vad2hen@mail.ru

Аннотация. Актуальность исследования продиктована необходимостью анализа современного состояния тематики сушки угля для выявления наиболее эффективных способов с точки зрения временных и энергетических затрат, а также экологической безопасности и улучшения качеств топлива. Как показывает практика, сушка – это один из самых важных этапов подготовки угля к сжиганию, она способствует повышению термической эффективности, снижению выбросов и загрязнения окружающей среды, увеличению энергетической мощности и улучшению стабильности сгорания. Среди основных способов сушки угля можно выделить сушку с испарением: А) ротационная сушка; Б) сушка в кипящем слое; В) иммерсионная сушка горячим маслом; Г) сушка в микроволновой печи, а также сушку без испарения: А) гидротермальное обезвоживание; Б) механическое/термическое обезвоживание; В) экстракция растворителем. При этом каждый из данных методов постоянно развивается, и требуется оценка влияния динамики этих изменений на ключевые характеристики процесса сушки. **Цель:** обзор и анализ современных способов сушки угля, наиболее эффективных с точки зрения временных и энергетических затрат. **Объектом** исследования является влажный материал – уголь, подверженный различным способам сушки. **Методы:** поиск работ по заявленной тематике с проверкой указания основных параметров сушки: время, энергозатрат и др. На основе полученных данных проведено сравнение различных способов сушки, рекомендованы оптимальные с точки зрения указанных параметров методы. В результате исследования были рассмотрены современные методы сушки угля, дана оценка их эффективности. Было установлено, что наиболее эффективными с точки зрения энергозатрат методами сушки угля являются: ротационная сушка, иммерсионная сушка горячим маслом, механическое/термическое обезвоживание и экстракция растворителем. Также были рассмотрены особенности каждого метода сушки.

Ключевые слова: сушка, уголь, СВЧ-излучение, сушка с испарением, сушка без испарения, теплоизлучение, конвекция, экологическая безопасность

Для цитирования: Саломатов В.В., Карелин В.А. Обзор современных методов сушки углей с оценкой их эффективности // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 5. – С. 182–193. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4377

UDC 621.311
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4377

Review of modern coal drying methods with the evaluation of their efficiency

V.V. Salomatov^{1,2}, V.A. Karelin^{1,2}✉

¹ Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

² S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

✉ vad2hen@mail.ru

Abstract. Relevance. The need to analyze the current state of the subject of coal drying in order to identify the most effective methods in terms of time and energy costs, as well as environmental safety and improve the quality of fuel. As practice shows,

drying is one of the most important stages in coal preparation for combustion, it helps to increase thermal efficiency, reduce emissions and environmental pollution, increase energy capacity and improve combustion stability. Among the main methods of drying coal, drying with evaporation: A) rotary drying; B) drying in a fluidized bed; C) immersion drying with hot oil; D) drying in a microwave oven, as well as drying without evaporation: A) hydrothermal dehydration; B) mechanical/thermal dehydration; C) solvent extraction, can be distinguished. At the same time, each of these methods is constantly evolving and it is required to evaluate the influence of the dynamics of these changes on the key characteristics of drying. **Aim.** Review and analysis of modern methods of coal drying, the most efficient in terms of time and energy costs. **Object.** Wet material – coal, subjected to various drying methods. **Methods.** Search for works on the stated topic, checking the indication of the main drying parameters: time, energy consumption, etc. Based on the data obtained, a comparison of various drying methods was carried out, and optimal methods were recommended. **Results.** The authors have considered the modern methods of drying coal and assessed their effectiveness. Rotary drying, hot oil immersion drying, mechanical/thermal dehydration and solvent extraction were found to be the most energy efficient methods for drying coal. The paper considers the features of each drying method.

Keywords: drying, coal, microwave radiation, drying with evaporation, drying without evaporation, heat radiation, convection, environmental safety

For citation: Salomatov V.V., Karelin V.A. Review of modern coal drying methods with the evaluation of their efficiency. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 5, pp. 182–193. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4377

Введение

Уголь, добытый с поверхности или из глубин, редко пригоден для непосредственного использования. Поэтому улучшение качества угля до требуемого уровня является важной международной задачей. Этот процесс включает в себя физические и/или химические методы удаления определенных компонентов и повышения его качества до пригодного для рынка уровня. Технологии, применяемые в обработке угля, могут различаться, но можно выделить четыре основных этапа: предварительная обработка, сепарация, сушка и утилизация отходов. Стоимость подготовки угля зависит от его характеристик, стоимости утилизации отходов, мощности завода по обработке и других факторов.

Очевидно, что дополнительные операции по подготовке угля требуют сложных систем, что приводит к увеличению затрат на его обработку. Процессы очистки угля, основанные на гравитационной сепарации или пенной флотации, обычно приводят к содержанию влаги в пределах 12–25 %, в зависимости от размера частиц. Более мелкие частицы имеют более высокое содержание влаги из-за большей площади поверхности, которая способствует задержке влаги. Высокая влажность угля снижает эффективность работы котла.

Сушка угля перед его сжиганием является важным процессом, который демонстрирует ряд преимуществ и необходим для эффективной работы котла или других систем термической обработки угля. Приведем несколько основных причин, почему важно проводить сушку угля перед сжиганием.

1. Повышение термической эффективности: уголь с высоким содержанием влаги требует больше энергии для его разогрева и испарения в процессе сжигания. Сушка угля снижает его влажность, что в свою очередь улучшает теплопере-

дачу и повышает термическую эффективность системы [1, 2].

2. Снижение выбросов и загрязнение окружающей среды: сжигание влажного угля может вызывать большое количество выбросов, которые могут содержать вредные вещества (NO_x, SO_x и др.). Сухой уголь, как правило, сжигается более чисто, что способствует улучшению качества воздуха и снижению негативного воздействия на окружающую среду [3–5].
3. Увеличение энергетической мощности: процесс сушки угля позволяет повысить его тепловую энергию за счет снижения содержания влаги. Сухой уголь имеет больший калорийный потенциал и может обеспечивать более высокую энергетическую мощность при его сжигании, что важно для эффективной работы тепловых установок [2, 5].
4. Улучшение стабильности сгорания: влажный уголь может вызывать неравномерное сгорание и повышенное образование сажи и других отложений на поверхности котла. Сушка угля помогает создать более стабильные условия сгорания и снизить риск непредвиденных отказов и поломок системы [2, 6].

С 2020 г. растёт уровень инвестиций в ископаемое топливо, в том числе в уголь [7]. Во многом это обуславливается необходимостью повышения эффективности использования угля и снижения выбросов при сжигании. Уголь в ближайшее время будет оставаться одним из самых востребованных видов топлива. Особенно это актуально для стран с развивающейся экономикой, где постоянно растущий спрос на энергию отчасти может быть обеспечен угольным топливом.

Также стоит отметить, что ряд методов сушки угля претерпели существенные изменения за по-

следнее десятилетие, тогда как остальные остались на том же уровне. Поэтому для выбора способа сушки для конкретного вида угля требуется знание особенностей, эффективности и экономической целесообразности современных методов обработки, что и обуславливает актуальность данного исследования.

Классификация видов воды в угле и технологий сушки

Для начала рассмотрим различные типы воды, связанной с углем. Можно выделить пять типов: внутренняя адсорбционная вода, поверхностная адсорбционная вода, межчастичная вода, капиллярная вода и адгезионная вода (рис. 1). Капиллярная вода содержится в капиллярах и мелких щелях, находящихся между различными частицами. Межчастичная вода находится между различными частицами, а адгезионная вода образует слой пленки вокруг поверхности конкретных частиц. Внутренняя адсорбционная вода содержится в микропорах и микрокапиллярах внутри каждой угольной частицы и откладывается в процессе формирования. Поверхностно-адсорбционная вода примыкает к молекулам угля, но только на поверхности частиц.

Некоторое количество воды можно легко удалить с помощью обычных методов, таких как ваку-

умные фильтры и центрифуги; другую воду необходимо испарить, нагревая уголь до более высокой температуры. Низкосортные угли сжимаются и растрескиваются после удаления большей части воды, что существенно повышает интенсивность процесса сушки [8, 9].

Для эффективной сушки угля существует большое количество методов, которые продолжают совершенствоваться. Выбор определенного метода должен быть обусловлен начальными характеристиками угля (влажность, электрофизические и теплофизические параметры, размер частиц и др.) и желательными конечными параметрами (влажность и размер частиц). Также немаловажными являются скорость процесса сушки, энергозатраты, экологическая безопасность. Только после определения данных параметров можно делать выбор в пользу того или иного метода сушки.

Технологии сушки угля можно разделить на сушку с испарением и без испарения [10, 11]. При этом для сушки с испарением используют ротационную сушку (вращающиеся барабаны), сушку погружением в горячее масло и микроволновую сушку. Сушка без испарения происходит с использованием гидротермического обезвоживания, механического термического обезвоживания и экстракции растворителем.

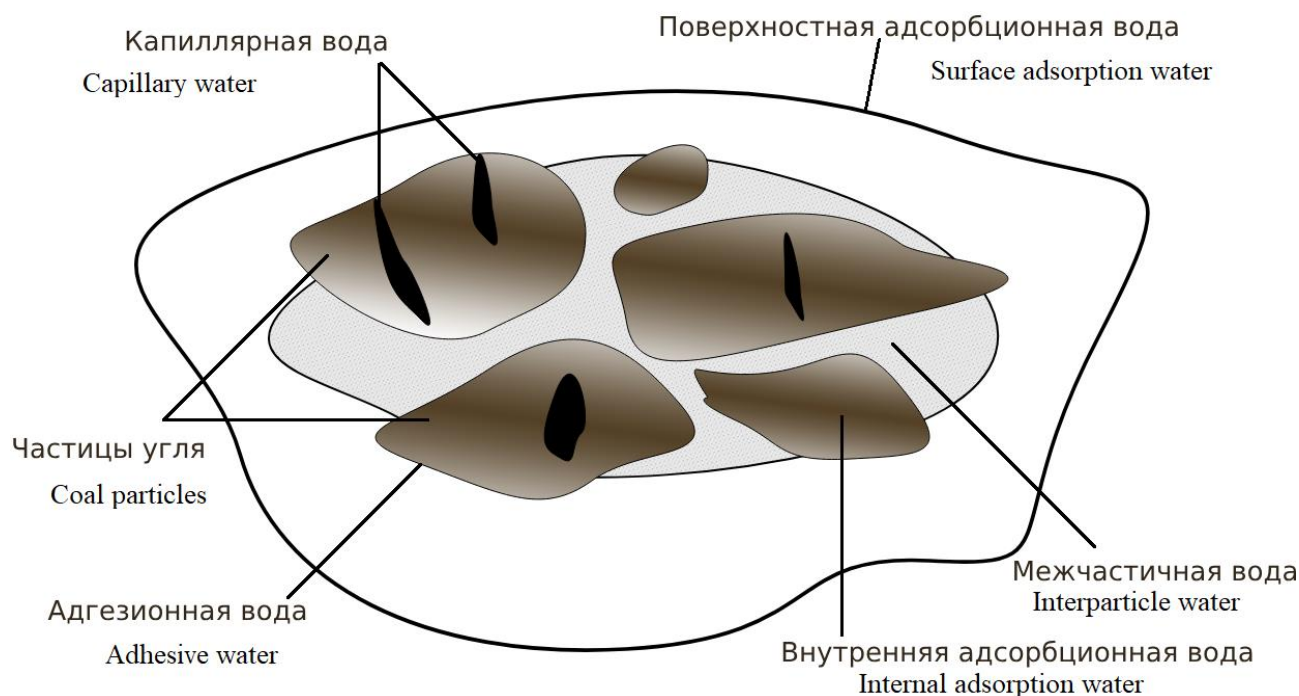


Рис. 1. Пять типов воды, связанных с углем
Fig. 1. Five types of water associated with coal

Сушка с испарением

А) Ротационная сушка

Технология ротационной сушки уже достаточно давно широко применяется в различных сферах [12, 13]. Основной особенностью этой технологии является способность сушилки вращаться во время процесса. В настоящее время наиболее распространены два типа вращающихся сушилок: с вращающимся барабаном и с вращающейся трубой. Оба устройства обычно имеют слегка наклонную конструкцию, и угол наклона может быть отрегулирован в диапазоне от 1 до 10 градусов. В системе с вращающимся барабаном сырой уголь загружается в барабан с помощью питателя. Сушилки с вращающимся барабаном могут быть разделены на системы с прямым и непрямым контактом в зависимости от того, как происходит взаимодействие угля с дымовыми газами [14].

Среди современных работ можно выделить исследование характеристик сушки угля с помощью продувки котла в роторной сушилке угля [15]. Схема используемой роторной сушилки в данной работе представлен на рис. 2.

В этой конструкции сушилки использован принцип теплопередачи в наборе из четырех паровых змеевиков. Продувка котла из барабана отработавшего пара поступала в паровые змеевики и нагревала сжатый воздух. Нагретый воздух прохо-

дил по четырем трубам, поступал во вращающийся барабан и сушил влажный уголь за счет непосредственного контактного теплообмена. Наконец, высушенный уголь и пыль отделяются в конце вращающегося барабана. Вращающийся барабан был изготовлен из нержавеющей стали без теплоизоляции, поэтому возможна потеря тепла при сушке. Сухой уголь собирался в отдельном контейнере, а пыль скапливалась в мешочном фильтре. При этом было изучено влияние на эффективность сушки и теплотворную способность угля следующих параметров: размера частиц угля (0,595, 1,18, 4,75 мм) и скорости подачи угля.

На основании экспериментальных данных при проведении процедур изменения расхода и крупности угля при фиксированных переменных: горячем воздухе 70 °С, расходе воздуха 37 кг/ч, давлении 0,03 МПа и типе угля, установлено, что наиболее существенное снижение влажности угля (на 20,7 %) было при расходе угля 20 кг/ч и размере 0,595 мм. Наиболее значительный прирост теплотворной способности угля был также при расходе 20 кг/ч и 0,595 мм с увеличением на 3680246,4 Дж/кг. Наилучшее значение КПД при проведении испытаний на роторной сушилке угля составило 86,98 % при энергетических потерях 13,02 %.

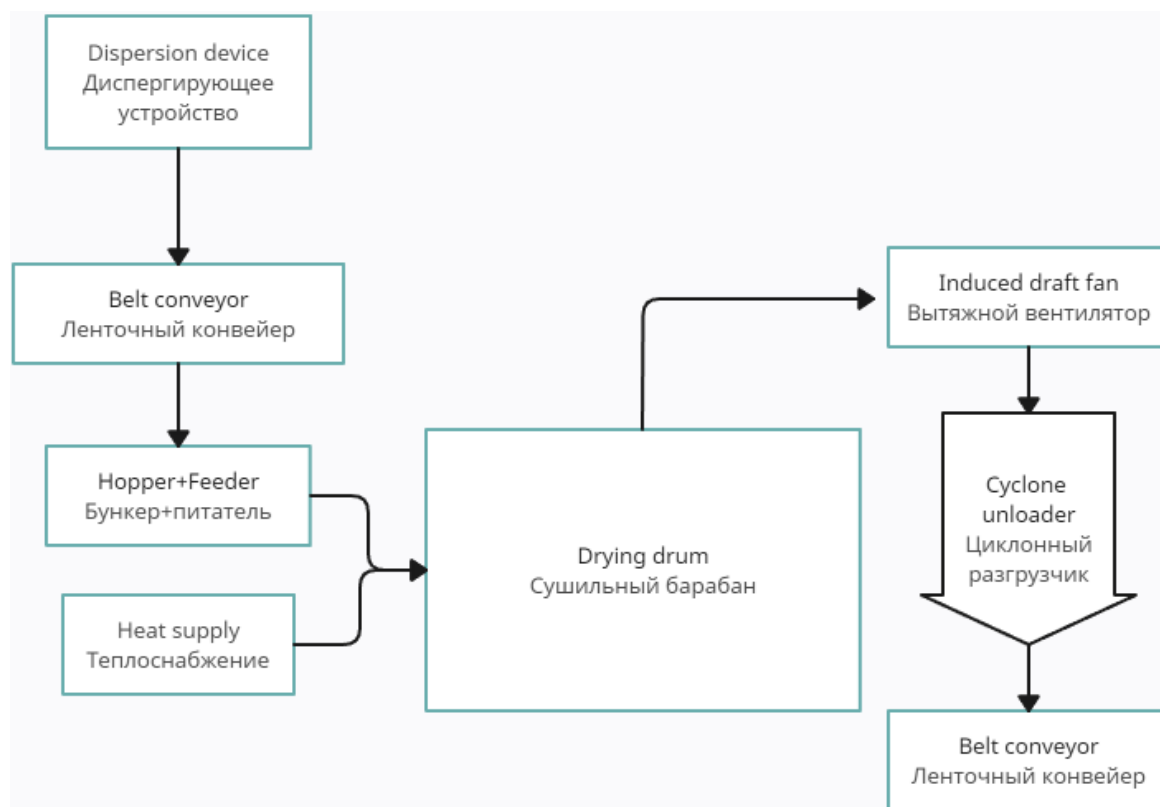


Рис. 2. Схема роторной сушилки
Fig. 2. Rotary dryer diagram

Б) Сушка в кипящем слое

Сушка в псевдооживленном слое означает, что процесс сушки происходит в слое, который содержит сушильную среду со свойствами жидкости [16]. Этот процесс может происходить периодически (что особенно эффективно для небольших объемов производства или материалов, чувствительных к теплу) или непрерывно. В сушильной системе используется сушильная среда, которая может быть горячим воздухом, дымовыми газами или перегретым паром. Уголь подается в сушилку сверху, а горячая сушильная среда выводится снизу псевдооживленного слоя. Горячая сушильная среда постоянно проходит через уголь, вызывая псевдооживление, и затем уголь подвергается сушке.

В одной из современных работ [17] приведено описание сушки с использованием вихревого аппарата с псевдооживленным слоем, как показано на рис. 3.

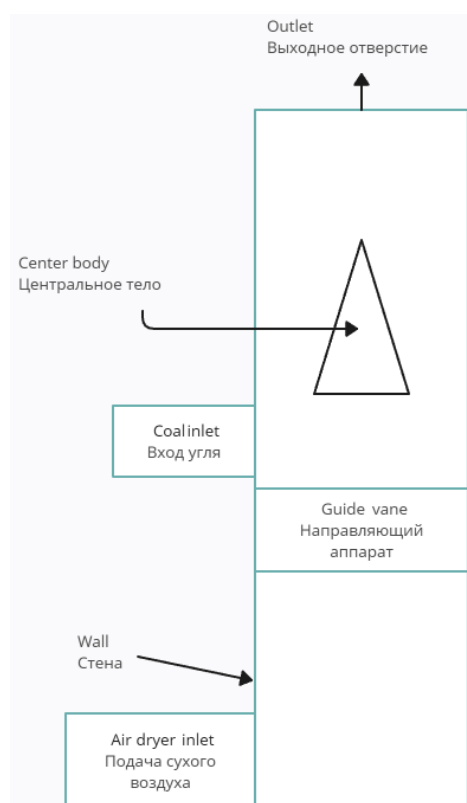


Рис. 3. Вихревая сушилка с псевдооживленным слоем
Fig. 3. Swirl fluidized bed dryer

Сушильная камера имеет диаметр 20 мм, длину 360 мм, посередине имеется конус высотой 200 мм для предотвращения накопления частиц. Начальная часть конуса имеет диаметр 110 мм. Камера изготовлена из акриловой трубы. Сухой воздух поступает в тангенциальном направлении, а затем выходит через расположение лопастей. Расположение

лопастей имеет угол наклона 10° при количестве 30 штук. На выходе имеется фильтр для предотвращения вылета частиц угля из камеры в процессе сушки. В эксперименте использовался индонезийский низкосортный уголь влажностью 25,17 %. Уголь в виде кусков дробят, а затем сортируют до крупности около 6 мм. Электрический нагреватель, которым можно управлять с помощью термостата, используется для нагрева воды в резервуаре, а затем циркулирует в двух радиаторах. Эти два радиатора нагревают окружающий воздух до 55°C [17]. Воздуходувка всасывает сухой воздух и использует его для сушки частиц угля в камере. Температура и относительная влажность воздуха осушителя измеряются на входе и выходе из камеры.

При этом эффективность сушки при низкой температуре за каждую минуту рассчитывается по уравнению:

$$\varepsilon_D = \frac{\text{Энергия для испарения в момент времени } t}{\left(\begin{array}{l} \text{Поступающая энергия} - \\ - \text{Энергия, уносимая воздухом} \end{array} \right) \text{ в момент времени } t}.$$

При проведении экспериментов расход воздуха на сушку составил 216 кг/ч при относительной влажности воздуха 10,4 % и температуре 55°C . Наиболее эффективная сушка происходила в течение первых 300 секунд с максимальным КПД 78,3 %. Сушка в течение 300 секунд может уменьшить коэффициент влажности с 1,0 до 0,28.

В) Иммерсионная сушка горячим маслом

Метод иммерсионной сушки в горячем масле представляет собой процесс, при котором низкосортный уголь погружается в нагретое масло. Японские исследователи предложили начать использование этого метода в начале 1990-х гг. [18]. Во время сушки погружением в горячее масло влажные материалы добавляются к маслу, которое нагревается до температуры, выше точки кипения воды, что создает сильный турбулентный поток на поверхности материала. Этот метод сушки очень эффективен, так как поверхностная вода и влага внутри материала могут быстро испаряться. Техника сушки погружением в горячее масло напоминает приготовление во фритюре и часто называется «сушкой-жаркой». Она особенно эффективна для материалов с высоким содержанием влаги, таких как мясо, овощи и органический шлам [19].

Описание одной из таких установок приведено в работе [20]. Цилиндрический реактор (высота 230 мм, диаметр 200 мм) и сетчатый приемник с квадратной сеткой для подачи углей в реактор (ширина 100 мм, длина 100 мм, высота 25 мм) изготовлены из нержавеющей стали. Массу масла в реакторе измеряли электронными весами, расположенными под сушильным аппаратом. Для точного контроля

температуры в реакторе был предусмотрен автоматический регулятор температуры. Ноутбук записывал изменения температуры и веса в зависимости от времени нагревания масла и времени высыхания угля. Масло предварительно нагревали до стабильной температуры 120, 130 или 140 °С перед добавлением 50 г угля на литр масла. Каждый эксперимент по обжарке–сушке проводился в течение 600 секунд. После сушки угли переносили в центробежный сепаратор на 600 секунд, после чего измеряли количество отделившегося масла. Для оценки эффективности сушки в каждом из условий реакции содержание влаги измеряли с помощью электрической печи в образцах, отобранных до и после процесса сушки и измельченных до однородного размера 0,25 мм. Измерения влажности были завершены в тот же день, чтобы исключить изменения содержания влаги. Для всех измеряемых параметров рассчитывали среднее арифметическое трех экспериментов.

При этом за последние годы достаточно мало работ по данной тематике. Связано это может быть со следующим обстоятельством. При достаточно высокой энергетической эффективности иммерсионной сушки горячим маслом (~ 95 %) этот метод сушки имеет ряд проблем, связанных с непрактичностью и высокой стоимостью использования масла [21].

Г) Сушка в микроволновой печи

Микроволны широко используются для сушки из-за своей высокой скорости нагрева и сокращения времени обработки [22, 23]. Сушка в микроволновой печи осуществляется путем преобразования электромагнитной энергии в тепловую. Микроволновая энергия представляет собой электромагнитное излучение с частотами от 300 МГц до 300 ГГц, или длинами волн от 1 до 300 мкм [24, 25]. Микроволновая сушка имеет множество преимуществ, включая быстрый и точечный нагрев, равномерное распределение тепла, гибкую модульную конструкцию, экологически безопасное применение, быстрое включение и выключение, а также высокую эффективность [26]. Микроволны могут проходить насквозь, поглощаться или отражаться, и не оказывают существенного воздействия на металлы, поскольку высокая проводимость отражает микроволны. Типичная схема установки по микроволновой сушке приведена на рис. 4 [27].

Для достижения оптимальной энергоэффективности микроволнового нагрева/сушки необходим индивидуальный подбор параметров микроволнового излучения, который основывается на диэлектрических и теплофизических свойствах конкретного угля. Одномодовая СВЧ-система, генерирующая определенную частоту и мощность, обладает более высокой энергоэффективностью по сравнению с многомодовыми СВЧ-системами.

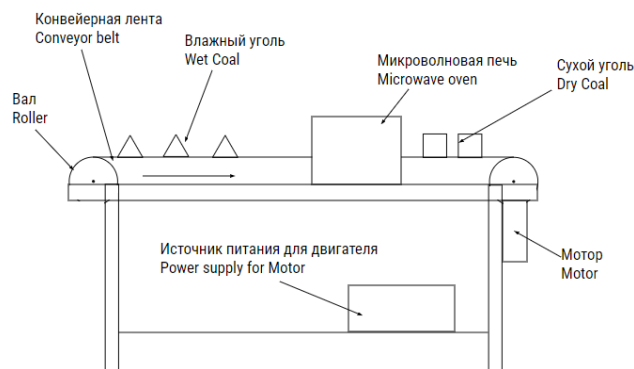


Рис. 4. Схема установки по микроволновой сушке
Fig. 4. Microwave drying plant diagram

Пилотные и полномасштабные системы одномодового типа обычно имеют эффективность более 80 %, в то время как эффективность многомодовых систем может составлять всего 40 % [28]. При этом более низкая микроволновая частота позволяет достичь большей глубины проникновения, но при этом несет меньше энергии. Малая мощность СВЧ приводит к низкой скорости нагрева, в то время как большая мощность может вызвать перегрев поверхностного слоя. Кроме того, эффект нагрева/сушки различных угольных образцов может сильно различаться при использовании одного и того же микроволнового устройства. Предыдущие исследования показали, что высокосортные угли обладают лучшим и более стабильным эффектом микроволнового нагрева, а микроволновая печь наилучшим образом работает с углями, содержащими низкое количество влаги и высокое содержание металлических минералов.

Сушка без испарения

А) Гидротермальное обезвоживание

Гидротермальное обезвоживание (ГТО) является методом сушки низкосортных углей без использования испарения. Сырой низкосортный уголь помещается в реактор без предварительной обработки и герметизируется азотом при определенном давлении и температуре окружающей среды [29]. Затем сырой уголь нагревается и перемешивается, при этом температура реакции автоматически регулируется до необходимого значения. В процессе гидротермального обезвоживания вода удаляется в жидком виде, чтобы сохранить скрытую теплоту парообразования. Кроме того, большая часть растворимого в воде неорганического вещества будет вымываться, что приведет к снижению содержания неорганических компонент в угле [30].

В одной из последних работ по данной тематике [31] был использован ГЭР (глубокий эвтектический растворитель, состоящий из ChCl и ZnCl_2) для улучшения процесса обогащения лигнита путем

удаления влаги и кислорода методом ГТО. Изменение физико-химического состава обогащенных углей не только улучшило качество бурого угля, но и значительно повлияло на характеристики горения. Основные результаты исследования: 1. При добавлении ГЭР в количестве от 0,0 до 3,0 г кривые горения бурого угля, модернизированного при 280 °С, смещались и задерживались в сторону более высокой температурной зоны. По сравнению с методом ГТО, использование ГЭР–ГТО подавляет тенденцию к самовозгоранию и увеличивает способность лигнита к реакции при горении; 2. Для бурого угля, модернизированного 3,0 г ГЭР ($\text{ChCl}:\text{ZnCl}_2=1:1$) при 250–300 °С, кривые горения сначала сместились в низкотемпературную, а затем в высокотемпературную зону. Метод ГЭР–ГТО способствовал повышению качества бурого угля без ухудшения преимуществ с точки зрения характеристик горения; 3. Для лигнита, обогащенного 3,0 г ГЭР при 300 °С, улучшенные угли имели аналогичные характеристики воспламенения при увеличении содержания ZnCl_2 в ГЭР. При увеличении содержания ZnCl_2 соответствующая стадия горения немного продвигалась вперед. При этом, как отме-

чают авторы, эффективность сушки увеличилась с 65,02 % (без добавления ГЭР) до 71,31 % (с добавлением 3,0 г ГЭР).

Б) Механическое/термическое обезвоживание

С целью повышения эффективности электростанций, работающих на буром угле, была разработана техника механического/термического обезвоживания. В этом процессе тепловая и механическая энергия были объединены, что позволило достичь быстрого обезвоживания и снизить затраты на вложение. На рис. 5 представлена схема установки для механического/термического обезвоживания [32]. Эта установка состоит из камеры для образцов из нержавеющей стали, пористой спеченной фритты и камеры для сбора воды. Процесс обезвоживания обычно выполняется в четыре этапа: установка лигнита в камеру, нагрев угля до заданной температуры для достижения термического обезвоживания, сжатие до постоянного давления для механического обезвоживания и охлаждение угля путем мгновенного испарения воды. При этом энергоэффективность данного метода может составлять 80–90 %.

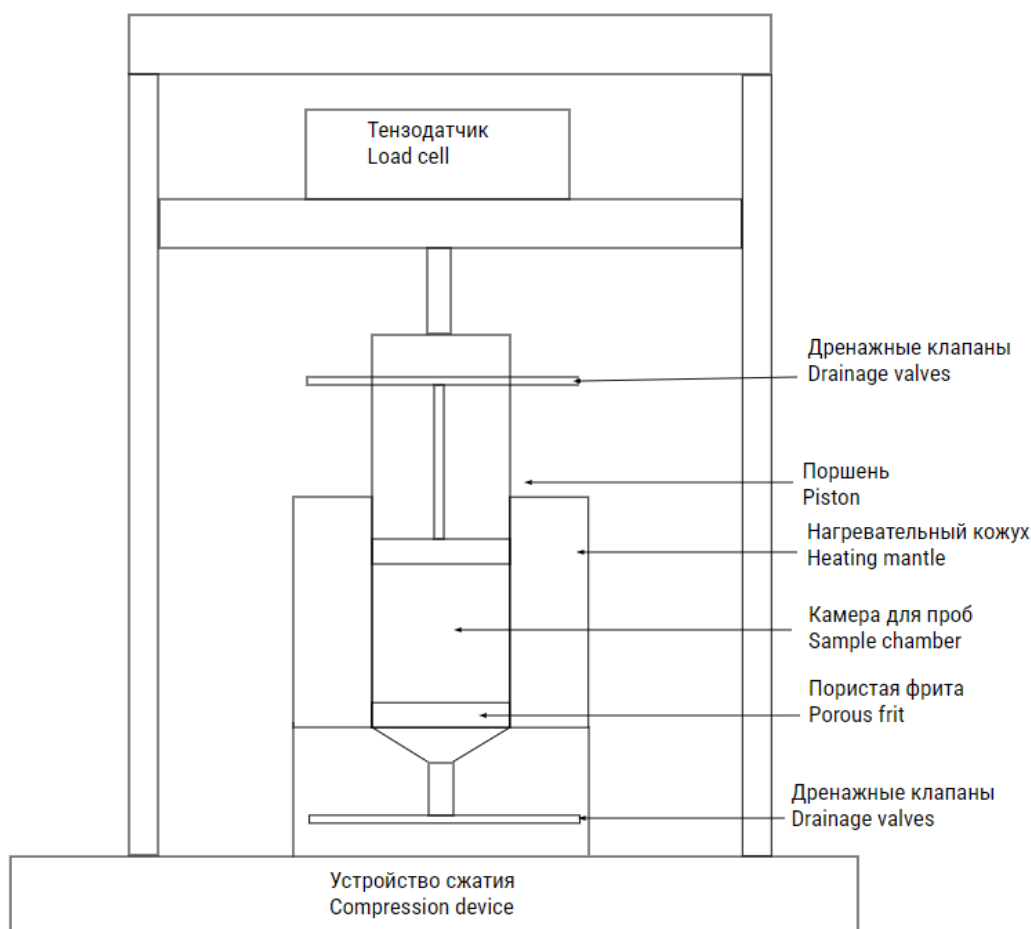


Рис. 5. Установка на основе метода механического/термического обезвоживания
 Fig. 5. Plant based on mechanical/thermal dewatering method

Однако, как отмечается в работе [21], основная проблема этой технологии заключается в том, что она влияет на физико-химические свойства материалов. Кроме того, добываемая вода становится непригодной для многих сценариев повторного использования из-за ее кислого, соленого и углеродного характера. Поэтому требуется дальнейшее развитие этой перспективной технологии, чтобы минимизировать изменение свойств полезных ископаемых и увеличить возможность повторного использования добываемой воды, что имеет большое значение при переработке полезных ископаемых.

В) Экстракция растворителем

Метод экстракции растворителем представляет собой способ удаления воды из низкокачественных углей без испарения. Этот энергосберегающий метод обезвоживания может проводиться при очень низких температурах. Исходный метод, предложенный в [33], заключается в том, что слой угля подвергается воздействию проточного неполярного растворителя при температуре ниже 200 °С. В ходе процесса происходит освобождение водородных связей воды, содержащейся в угле, под воздействием тепла, а затем выделенная вода поглощается растворителем, который должен быть удален из угля. Затем смесь воды и растворителя охлаждается до комнатной температуры, чтобы уменьшить их растворимость в воде и отделить их друг от друга. Экстракция растворителем также используется при переработке минерального сырья, такого как руды редких земель, цинк-свинцовая руда, литий, ванадий и марганец.

В одной из актуальных работ [34] был предложен метод деградационной экстракции растворителем для облагораживания низкосортных углей для их каскадной утилизации в высокодисперсной среде. Полученные продукты показали значительно улучшенные свойства по сравнению с исходными данными углей.

Для проведения экспериментов использовался реактор периодического действия, подробно описанный в работе [34]. Реактор состоял из автоклава и резервуара, соединенных промежуточным клапаном. Фильтр (0,5 мкм) был установлен на дне автоклава для разделения при высокой температуре. В каждом опыте в реактор помещали 25 г угля и 250 мл 1-МН для лучшего диспергирования. Реактор трижды продувался азотом, чтобы проверить герметичность при давлении 0,2 МПа. Затем реактор нагревали до 350 °С со скоростью нагрева 5 °С/мин и выдерживали в течение 60 минут. После завершения программы нагрева промежуточный клапан открывали, и жидкость при 350 °С, содержащая растворитель и экстрагируемые вещества, стекала в резервуар под действием давления. Часть экстрактов осаждалась при комнатной температуре в ре-

зервуаре и отделялась фильтрацией, остальные экстракты, растворимые при комнатной температуре, перегонялись вакуумом. Осадки были высушены в вакуумной печи при 150 °С в течение 12 часов для удаления растворителя. Газообразные продукты собирались в газовых мешках для последующих испытаний. Выходы твердых продуктов рассчитывались по их массе, а суммарный выход жидких и газообразных продуктов рассчитывался по массовому балансу.

В целом данный метод, помимо повышения качества угля, обладает высокой эффективностью сушки. Тем не менее эта технология все еще находится на стадии разработки концепции, и необходимы дальнейшие исследования и разработки, чтобы процесс можно было масштабировать и использовать в промышленных приложениях.

В таблице приведено итоговое сравнение по КПД процессов сушки, а также основные особенности, позволяющие подобрать оптимальный режим в зависимости от рассматриваемого вида угля и других входных данных.

Заключение

На основе проведенного анализа можно заключить, что в настоящий момент наиболее эффективными с точки зрения энергозатрат методами сушки угля являются: ротационная сушка, иммерсионная сушка горячим маслом, механическое/термическое обезвоживание и экстракция растворителем. При этом каждый из приведенных способов обладает рядом дополнительных особенностей. Так, сушка горячим маслом связана с необходимостью утилизации отработавшего масла. Микроволновый способ требует достаточно высоких электрофизических параметров угля для эффективной сушки, однако обладает высокой скоростью процесса и может быть использован для повышения производительности производства сухого угля. Ротационный способ и сушка на основе кипящего слоя, как правило, используют воздух, что существенно упрощает конструкцию установки. Гидротермальный способ и экстракция растворителем требуют дополнительной подготовки угля, но могут быть интересны тем, что вода удаляется в жидком виде. При необходимости предварительного измельчения и деформации угля может быть интересен метод механического/термического обезвоживания. При этом с точки зрения низких временных затрат наиболее подходящими методами сушки угля являются: микроволновая сушка, сушка в кипящем слое и иммерсионная сушка горячим маслом. Для окончательного выбора метода сушки требуется учет не только высокого КПД, но и дополнительных особенностей каждого метода сушки в относительности выбранного вида угля.

Таблица. Результаты сравнения современных методов сушки
Table. Results of comparison of modern drying methods

Метод сушки Drying method	Максимальный КПД, % Maximum efficiency, %	Особенности Peculiarities
Ротационная сушка Rotary drying	87	• Равномерный процесс сушки/Uniform drying • Сложная компоновка системы/Complex system layout • Утечка пара является большой проблемой из-за вращающихся и неподвижных частей Steam leakage is a big problem due to rotating and stationary parts
Сушка в кипящем слое Fluidized bed drying	78	• Обеспечивает быструю и однородную сушку/Provides fast and uniform drying • Эффективна при низкой температуре/Effective at low temperatures • Низкие затраты на техническое обслуживание, меньшее время простоя Low maintenance costs, less downtime • Неравномерная структура потока/Uneven flow pattern • Вероятность накопления электростатического заряда может быть высокой There may be a high chance of electrostatic charge accumulation
Иммерсионная сушка горячим маслом Hot oil immersion drying	95	• Высокий КПД/High efficiency • Непрактичность/Impractical • Высокая стоимость использования масла/High cost of oil use
Сушка в микроволновой печи Microwave drying	80	• Быстрый, объёмный и точечный нагрев/Fast, volumetric and spot heating • Равномерное распределение тепла/Even heat distribution • Гибкая модульная конструкция/Flexible modular design • Низкая тепловая инерционность/Low thermal inertia • Возможное повышение энергозатрат из-за неэффективности магнетрона и линий передач Possible increase in energy costs due to inefficiency of the magnetron and transmission lines
Гидротермальное обезвоживание Hydrothermal dehydration	71	• Вода удаляется в жидком виде, чтобы сохранить скрытую теплоту парообразования Water is removed in liquid form to retain the latent heat of vaporization • Дорогое оборудование/Expensive equipment • Высокие температуры/High temperatures
Механическое/термическое обезвоживание Mechanical/thermal dehydration	90	• Высокий КПД/High efficiency • Высокая скорость/High speed • Низкие затраты/Low costs • Вода удаляется в жидком виде, чтобы сохранить скрытую теплоту парообразования Water is removed in liquid form to retain the latent heat of vaporization • Влияет на физико-химические свойства материалов Affects the physical and chemical properties of materials • Добываемая вода становится непригодной для повторного использования из-за ее кислого, соленого и углеродного характера Produced water becomes unsuitable for reuse due to its acidic, salty and carbon-rich nature
Экстракция растворителем Solvent extraction	87	• Вода удаляется в жидком виде, чтобы сохранить скрытую теплоту парообразования Water is removed in liquid form to retain the latent heat of vaporization • Возможно облагораживание низкосортных углей Upgrading of low-grade coals is possible • Технология все еще находится на стадии разработки концепции Technology is still in concept stage

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A novel method for low-rank coal drying using steam transient flash evaporation / S. Zongsheng, Z. Yuemin, Y. Guanghui, Y. Huatuo, Z. Mingrui, Z. Bo // Fuel. – 2023. – Vol. 354. – P. 1–10.
2. Low-rank coal drying behaviors under negative pressure: thermal fragmentation, volume shrinkage and changes in pore structure / R. Lingkun, X. Jinghao, W. Xiaoping, S. Jialei, J. Fengjun, C. Mo // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 272. – № 1. – P. 1–10.
3. Thermogravimetric study and modeling for the drying of a Chinese lignite / A. Tahmasebi, J. Yu, Y. Han, H. Zhao, S. Bhattacharya // Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering. – 2013. – Vol. 8. – P. 793–803.
4. Kabir K.B., Hein K., Bhattacharya S. Process modelling of dimethyl ether production from Victorian brown coal integrating coal drying, gasification and synthesis processes // Computers & Chemical Engineering. – 2013. – Vol. 48. – P. 96–104.
5. A comprehensive analysis of a thermal energy storage concept based on lowrank coal pre-drying for reducing the minimum load of coal-fired power plants / S. Yang, X. Cheng, X. Tuantuan, X. Gang, Y. Yongping // Applied Thermal Engineer. – 2019. – Vol. 156. – P. 77–90.
6. Investigation of technical and economic aspects of pre-dried lignite utilisation in a modern lignite power plant towards zero CO₂ emissions / M. Agraniotis, A. Koumanakos, A. Doukelis, S. Karellas, E. Kakaras // Energy. – 2012. – Vol. 45. – P. 134–141.
7. IEA, Annual investment in fossil fuels and clean energy, 2015–2023, IEA, Paris. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/annual-investment-in-fossil-fuels-and-clean-energy-2015-2023> (дата обращения 25.08.2023).

8. Karthikeyan M., Zhonghua W., Mujumdar A.S. Low-rank coal drying technologies – current status and new developments // *Drying Technology*. – 2009. – Vol. 27. – P. 403–415.
9. Karr C. Analytical methods for coal and coal products. – New York: Academic Press, 1978. – 580 p.
10. Tian J., Liu B. Progress and application of Lignite drying technologies // *Coal Chemistry Industry*. – 2012. – Vol. 3. – P. 1–5.
11. Experimental study on drying and reabsorption of the lignite of Ximeng / W.G. Shen, J.Z. Liu, Y.J. Yu, J.F. Zhu, J.H. Zhou, K.F. Cen // *Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*. – 2013. – Vol. 33. – P. 64–71.
12. Lignite drying with steam tube rotary dryer and its heat transfer characteristics / X.H. Yu, H.Y. Liao, J.P. Zhai, Z.F. Zhan, X. Zhao // *Clean Coal Technology*. – 2013. – Vol. 19. – P. 52–54.
13. Kakaras E., Ahladas P., Symopoulos S. Computer simulation studies for the integration of an external dryer into a Greek lignite-fired power plant // *Fuel*. – 2002. – Vol. 81. – P. 583–593.
14. Development and application situation of lignite drying technology / B. Jiang, S. Li, J.R. Gao, G.L. Liang, H. Meng, Z.G. Yang // *Clean Coal Technology*. – 2011. – Vol. 17. – P. 69–72.
15. Marbun A.G., Dwiyanoro B.A., Tarmizi A.M. Study of coal drying characteristics using boiler blowdown in a rotary coal dryer // *JMES The International Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. – 2022. – Vol. 6. – № 1. – P. 37–45.
16. Syahrula S., Hamdullahpurb F., Dincer I. Thermal analysis in fluidized bed drying of moist particles // *Applied Thermal Engineering*. – 2002. – Vol. 22. – № 15. – P. 1763–1775.
17. Experimental and numerical study of coal swirl fluidized bed drying on 10° angle of guide vane / M.E. Simanjuntak, Prabowo, W.A. Widodo, Sutrisno, M.B.H. Sitorus // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2019. – Vol. 33. – № 11. – P. 5499–5505.
18. A study on the dewatering of industrial waste sludge by fry-drying technology / T.I. Ohm, J.S. Chae, J.E. Kim, H.K. Kim, S.H. Moon // *Journal of Hazardous Materials*. – 2009. – Vol. 168. – № 1. – P. 445–450.
19. The evaporative drying of sludge by immersion in hot oil: effects of oil type and temperature / T.I. Ohm, J.S. Chae, K.S. Lim, S.H. Moon // *Journal of Hazardous Materials*. – 2010. – Vol. 178. – P. 483–488.
20. Evaluation of a hot oil immersion drying method for the upgrading of crushed low-rank coal / T.I. Ohm, J.S. Chae, J.H. Lim, S.H. Moon // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2012. – Vol. 26. – № 4. – P. 1299–1303.
21. Advances in dewatering and drying in mineral processing / B.A. Chaedir, J.C. Kurnia, A.P. Sasmito, A.S. Mujumdar // *Drying Technology*. – 2021. – Vol. 39. – № 11. – P. 1–18.
22. Fakhreddin S. Recent Progress and application of freeze dryers for agricultural product drying // *ChemBioEng Reviews*. – 2023. – Vol. 10. – № 5. – P. 618–627.
23. Effect of pre-treatments assisted microwave drying on kinetics and energy aspects of dragon fruit / C. Necati, G. Seda, K. Kevser, S. Cevdet // *Current Trends in Natural Sciences*. – 2022. – Vol. 11. – № 21. – P. 79–87.
24. Uslu T., Atalay Ü. Microwave heating of coal for enhanced magnetic removal of pyrite // *Fuel Processing Technology*. – 2004. – Vol. 85. – № 1. – P. 21–29.
25. Barba A.A., Dalmoro A., D'Amore M. Microwave assisted drying of cellulose derivative (HPMC) granular solids // *Powder Technology*. – 2013. – Vol. 237. – P. 581–585.
26. Карелин В.А., Саломатов В.В. Математическая модель переноса тепла в слое диэлектрика при СВЧ-облучении // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2023. – Т. 30. – № 2. – С. 375–380.
27. Seehra M.S., Kalra A., Manivannan A. Dewatering of fine coal slurries by selective heating with microwaves // *Fuel*. – 2007. – Vol. 86. – № 5–6. – P. 829–834.
28. Improving coal permeability using microwave heating technology – a review / J. Huang, G. Xu, Y. Liang, G. Hu, P. Chang // *Fuel*. – 2020. – Vol. 266. – P. 1–16.
29. Mursito A.T., Hirajima T., Sasaki K. Upgrading and dewatering of raw tropical peat by hydrothermal treatment // *Fuel*. – 2010. – Vol. 89. – № 3. – P. 635–641.
30. Favas G., Jackson W.R. Hydrothermal dewatering of lower rank coals. 1. Effects of process conditions on the properties of dried product // *Fuel*. – 2003. – Vol. 82. – P. 53–57.
31. Combustion performance of lignite after efficient upgrading via deep eutectic solvent-assisted hydrothermal dewatering / J. Li, Y. Yu, R. Huang, X. Yao, Y. Tang, Y. He // *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*. – 2023. – Vol. 18. – № 3. – P. 1–13.
32. Hulston J., Favas G., Chaffee A.L. Physico-chemical properties of Loy Yang lignite dewatered by mechanical thermal expression // *Fuel*. – 2005. – Vol. 84. – P. 1940–1948.
33. Dewatering of Coal through Solvent Extraction / K. Miura, K. Mae, R. Ashida, T. Tamura, T. Ihara // *Fuel*. – 2002. – Vol. 81. – № 11. – P. 1417–1422.
34. Degradative solvent extraction of low-rank coal: role of water on pyrolysis mechanism of low-rank coal in a highly-dispersed medium / Z. Hu, X. Zhang, X. Li, W. Qian, G. Luo, H. Liu, H. Hu, N. Worasuwannarak, H. Yao // *Carbon Resources Conversion*. – 2022. – Vol. 5. – № 2. – P. 111–118.

Информация об авторах

Владимир Васильевич Саломатов, доктор технических наук, профессор кафедры физики неравновесных процессов Новосибирского государственного университета, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1; главный научный сотрудник института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1. salomatov.vv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8072-3246>

Вадим Александрович Карелин, старший преподаватель кафедры физики неравновесных процессов Новосибирского государственного университета, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1; инженер института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1. vad2hen@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4813-8872>

Поступила в редакцию: 05.09.2023

Поступила после рецензирования: 13.02.2024

Принята к публикации: 26.04.2024

REFERENCES

1. Zongsheng S., Yuemin Z., Guanghui Y., Huatuo Y., Mingrui Z., Bo Z. A novel method for low-rank coal drying using steam transient flash evaporation. *Fuel*, 2023, vol. 354, pp. 1–10.
2. Lingkun R., Jinghao X., Xiaoping W., Jialei S., Fengjun J., Mo C. Low-rank coal drying behaviors under negative pressure: thermal fragmentation, volume shrinkage and changes in pore structure. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 272, no. 1, pp. 1–10.
3. Tahmasebi A., Yu J., Han Y., Zhao H., Bhattacharya S. Thermogravimetric study and modeling for the drying of a Chinese lignite. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2013, vol. 8, pp. 793–803.
4. Kabir K.B., Hein K., Bhattacharya S. Process modelling of dimethyl ether production from Victorian brown coal integrating coal drying, gasification and synthesis processes. *Computers & Chemical Engineering*, 2013, vol. 48, pp. 96–104.
5. Yang S., Cheng X., Tuantuan X., Gang X., Yongping Y. A comprehensive analysis of a thermal energy storage concept based on low rank coal pre-drying for reducing the minimum load of coal-fired power plants. *Applied Thermal Engineering*, 2019, vol. 156, pp. 77–90.
6. Agraniotis M., Koumanakos A., Doukelis A., Karellas S., Kakaras E. Investigation of technical and economic aspects of pre-dried lignite utilisation in a modern lignite power plant towards zero CO₂ emissions. *Energy*, 2012, vol. 45, pp. 134–141.
7. IEA, *Annual investment in fossil fuels and clean energy, 2015–2023*. IEA, Paris. Available at: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/annual-investment-in-fossil-fuels-and-clean-energy-2015-2023> (accessed 25 August 2023).
8. Karthikeyan M., Zhonghua W., Mujumdar A.S. Low-rank coal drying technologies – current status and new developments. *Drying Technology*, 2009, vol. 27, pp. 403–415.
9. Karr C. *Analytical methods for coal and coal products*. New York, Academic Press, 1978. 580 p.
10. Tian J., Liu B. Progress and application of Lignite drying technologies. *Coal Chemistry Industry*, 2012, vol. 3, pp. 1–5.
11. Shen W.G., Liu J.Z., Yu Y.J., Zhu J.F., Zhou J.H., Cen K.F. Experimental study on drying and reabsorption of the lignite of Ximeng. *Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*, 2013, vol. 33, pp. 64–71.
12. Yu X.H., Liao H.Y., Zhai J.P., Zhan Z.F., Zhao X. Lignite drying with steam tube rotary dryer and its heat transfer characteristics. *Clean Coal Technology*, 2013, vol. 19, pp. 52–54.
13. Kakaras E., Ahladas P., Symopoulos S. Computer simulation studies for the integration of an external dryer into a Greek lignite-fired power plant. *Fuel*, 2002, vol. 81, pp. 583–593.
14. Jiang B., Li S., Gao J.R., Liang G.L., Meng H., Yang Z.G. Development and application situation of lignite drying technology. *Clean Coal Technology*, 2011, vol. 17, pp. 69–72.
15. Marbun A.G., Dwiyanoro B.A., Tarmizi A.M. Study of coal drying characteristics using boiler blowdown in a rotary coal dryer. *International Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 2022, vol. 6, no. 1, pp. 37–45.
16. Syahrula S., Hamdullahpurb F., Dincer I. Thermal analysis in fluidized bed drying of moist particles. *Applied Thermal Engineering*, 2002, vol. 22, no. 15, pp. 1763–1775.
17. Simanjuntak M.E., Prabowo, Widodo W.A., Sutrisno, Sitorus M.B. H. Experimental and numerical study of coal swirl fluidized bed drying on 10° angle of guide vane. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2019, vol. 33, no. 11, pp. 5499–5505.
18. Ohm T.I., Chae J.S., Kim J.E., Kim H.K., Moon S.H. A study on the dewatering of industrial waste sludge by fry-drying technology. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, vol. 168, no. 1, pp. 445–450.
19. Ohm T.I., Chae J.S., Lim K.S., Moon S.H. The evaporative drying of sludge by immersion in hot oil: effects of oil type and temperature. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, vol. 178, pp. 483–488.
20. Ohm T.I., Chae J.S., Lim K.S., Moon S.H. Evaluation of a hot oil immersion drying method for the upgrading of crushed low-rank coal. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012, vol. 26, no. 4, pp. 1299–1303.
21. Chaedir B.A., Kurnia J.C., Sasmito A.P., Mujumdar A.S. Advances in dewatering and drying in mineral processing. *Drying Technology*, 2021, vol. 39, no. 11, pp. 1–18.
22. Fakhreddin S. Recent progress and application of freeze dryers for agricultural product drying. *ChemBioEng Reviews*, 2023, vol. 10, no. 5, pp. 618–627.
23. Necati C., Seda G., Kevser K., Cevdet S. Effect of pre-treatments assisted microwave drying on kinetics and energy aspects of dragon fruit. *Current Trends in Natural Sciences*, 2022, vol. 11, no. 21, pp. 79–87.
24. Uslu T., Atalay Ü. Microwave heating of coal for enhanced magnetic removal of pyrite. *Fuel Processing Technology*, 2004, vol. 85, no. 1, pp. 21–29.
25. Barba A.A., Dalmoro A., D'Amore M. Microwave assisted drying of cellulose derivative (HPMC) granular solids. *Powder Technology*, 2013, vol. 237, pp. 581–585.
26. Karelin V.A., Salomatov V.V. Mathematical model of heat transfer in a dielectric layer under microwave irradiation. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2023, vol. 30, no. 2, pp. 375–380.
27. Seehra M.S., Kalra A., Manivannan A. Dewatering of fine coal slurries by selective heating with microwaves. *Fuel*, 2007, vol. 86, no. 5–6, pp. 829–834.
28. Huang J., Xu G., Liang Y., Hu G., Chang P. Improving coal permeability using microwave heating technology – a review. *Fuel*, 2020, vol. 266, pp. 1–16.
29. Mursito A.T., Hirajima T., Sasaki K. Upgrading and dewatering of raw tropical peat by hydrothermal treatment. *Fuel*, 2010, vol. 89, no. 3, pp. 635–641.
30. Favas G., Jackson W.R. Hydrothermal dewatering of lower rank coals. Effects of process conditions on the properties of dried product. *Fuel*, 2003, vol. 82, pp. 53–57.

31. Li J., Yu Y., Huang R., Yao X., Tang Y., He Y. Combustion performance of lignite after efficient upgrading via deep eutectic solvent-assisted hydrothermal dewatering. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2023, vol. 18, no. 3, pp. 1–13.
32. Hulston J., Favas G., Chaffee A.L. Physico-chemical properties of Loy Yang lignite dewatered by mechanical thermal expression. *Fuel*, 2005, vol. 84, pp. 1940–1948.
33. Miura K., Mae K., Ashida R., Tamura T., Ihara T. Dewatering of Coal through Solvent Extraction. *Fuel*, 2002, vol. 81, no. 11, pp. 1417–1422.
34. Hu Z., Zhang X., Li X., Qian W., Luo G., Liu H., Hu H., Worasuwannarak N., Yao H. Degradative solvent extraction of low-rank coal: role of water on pyrolysis mechanism of low-rank coal in a highly-dispersed medium. *Carbon Resources Conversion*, 2022, vol. 5, no. 2, pp. 111–118.

Information about the authors

Vladimir V. Salomatov, Dr. Sc., Professor, Novosibirsk State University, 1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; Senior Researcher, S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Academician Lavrentiev avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. salomatov.vv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8072-3246>

Vadim A. Karelin, Senior Lecturer, Novosibirsk State University, 1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; Engineer, S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Academician Lavrentiev avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. vad2hen@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4813-8872>

Received: 05.09.2023

Revised: 13.02.2024

Accepted: 26.04.2024