




Разработка новых способов энерготехнологической переработки углей Кыргызстана

Нуржамал Тунаевна Алдашева^{1,2*} , Бактыбек Суюнбекович Чилдебаев¹ ,
Айшакан Суйунбековна Суйунбекова³ , Юрий Анатольевич Дьячков¹ , Ысламидин Ташполотов^{2,3} 

¹ Ошский Технологический университет имени М.М. Адышева, Ош, Кыргызская Республика

² Институт природных ресурсов имени А.С. Джаманбаева, Южное отделение Национальной академии наук Кыргызской Республики, Ош, Кыргызская Республика

³ Ошский государственный университет, Ош, Кыргызская Республика

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: aldasheva73.20@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящей работе исследованы определение выхода летучих веществ из угля Кыргызстана и получение из него особо чистого углерода с целью возможного применения его в современных углеродных нанотехнологиях в строительстве. Определены органические и неорганические составляющие выхода различных видов углей и проведен анализ полученных летучих веществ. **Методы и материалы.** Процесс исследования основывался на применении эмпирических (наблюдение, эксперимент, измерение, сравнение) методов, а также химического с использованием кислот (на этапе очистки исследуемого угля от примесей металлов) и метода транспортной реакции (на этапе очистки исследуемого угля от примесей оксида кремния). Рассмотрены методы, позволяющие получить особо чистый углерод из месторождений каменного угля Кыргызстана. В качестве исследуемого материала, при определении выхода летучих веществ из исходного исследуемого сырья, использованы серые и бурые угли месторождения южного региона Кыргызстана. В ходе исследования заранее взвешенное сырье помещали в реактор и после его герметичного закрытия производили медленный пиролиз исследуемого угля в диапазоне заданных температур. Конструктивные элементы реактора выполнены из нержавеющей стали. Когда за объект исследования принимали бурый уголь, то процесс пиролиза проводили в диапазоне температур 100–550 °С. Исследования пиролиза каменного угля проводились в диапазоне температур 100–1100 °С. Исследования процессов пиролиза вышеуказанных углей проводились до момента полного прекращения выделения из объектов исследования жидких и газообразных продуктов распада. **Результаты.** Очистили исследуемые угли от жидких и газообразных примесей пиролизом. Определены количественный и качественный составы, а также содержание летучих газов исследуемых углей. В процессе пиролиза в интервале температур от 100 °С до 850 °С произошло разделение веществ с образованием пирогенетической воды, а также выделились газообразные вещества NO, CO₂, CO, H₂S, CH₄ и др. При пиролизе бурого угля в температурном диапазоне 150–170 °С выход летучих веществ составил 61,9%. При пиролизе каменного угля в диапазоне 380–400 °С выход летучих веществ составил 15,5%. Получили в результате пиролиза в реакторе уголь, в составе которого остались только твердые примеси металлов и оксида кремния (SiO₂), входящих в состав его макро- и микроэлементов. Очистили исследуемые угли от твердых примесей соединения различных металлов, применив химический метод с использованием смеси концентрированной серной и азотной кислот в соотношении 1:3. Очистили полученные исследуемые угли от твердых примесей оксида кремния, применив транспортную реакцию (за счет конвекции газов). Получили в результате очистки из исследуемых углей особо чистый углерод, содержащий только атомы углерода C–C–C. **Заключение.** Использование предложенной экспериментальной установки и технологической схемы очищения угля от примесей для получения чистого углерода с использованием транспортных реакций в промышленном масштабе позволяют более эффективно производить переработку и получение угля, содержащего чистый углерод, входящий в состав строительных наноматериалов и использование которого в строительстве с применением нанотехнологий позволяет значительно улучшать характеристики строительных конструкций и покрытий, а также снизит вредное воздействие продуктов сгорания на окружающую среду, что сократит затраты на природоохраняемые мероприятия.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Нанотехнологии, особо чистый углерод, наноматериалы, графен, углеродные нанотрубки, строительство, измельчение, мельница, сито, пиролиз, бурый уголь, реактор, летучие газы, промывка, нейтрализация, pH-среда, очищение, примесь, транспортная реакция, каменный уголь, кокс, конвекция газов, фильтрация, сушка

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Алдашева Н.Т., Чилдебаев Б.С., Суйунбекова А.С., Дьячков Ю.А., Ташполотов Ы. Разработка новых способов энерготехнологической переработки углей Кыргызстана. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(1):42–53. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-1-42-53>. – EDN: NEZTYG.

Development of new methods for energy technology processing of kyrgyzstan coals

Nurzhamal T. Aldasheva^{1,2*} , Baktybek S. Childebaev¹ , Aishakan S. Suyunbekova³ , Yurii A. Diachkov¹ , Islamidin Tashpolotov^{2,3} 

¹ Osh Technological University named after M.M. Adyshev, Osh, Kyrgyz Republic

² Institute of Natural Resources A.S. Dzhamanbaev, Southern Branch of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Osh, Kyrgyz Republic

³ Osh State University, Osh, Kyrgyz Republic

* Corresponding author: e-mail: aldasheva73.20@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. This study explores methods for determining the yield of volatile matter from Kyrgyz coal and obtaining ultra-pure carbon for potential applications in modern carbon nanotechnologies used in the construction industry. Both organic and inorganic components of various coal types were analyzed, along with the composition of the released volatile substances. **Methods and materials.** We used in the research empirical methods (observation, experimentation, measurement, and comparison), alongside chemical methods involving acid treatment (for the removal of metallic impurities) and a transport reaction method (for the removal of silicon oxide impurities). The study focused on obtaining ultra-pure carbon from bituminous coal deposits in Kyrgyzstan. The tested raw materials included grey and brown coals from deposits in the southern region of Kyrgyzstan. Pre-weighed samples were placed in a stainless-steel reactor and subjected to slow pyrolysis under sealed conditions across specific temperature ranges. For brown coal, pyrolysis was conducted between 100 °C and 550 °C, while for bituminous coal the range was 100 °C to 1100 °C. The process continued until all liquid and gaseous pyrolysis products ceased to be released. **Results.** Pyrolysis was used to remove volatile liquid and gaseous impurities from the coal samples. The qualitative and quantitative composition of the volatile gases was determined. During pyrolysis in the 100 °C to 850 °C range, pyrogenetic water was formed, and gaseous products such as NO, CO₂, CO, H₂S, CH₄, and others were released. For brown coal, the yield of volatile substances at 150–170 °C was 61.9%. For bituminous coal, at 380–400 °C, the yield was 15.5%. Post-pyrolysis, the remaining coal contained only solid impurities – primarily metallic elements and silicon dioxide (SiO₂). These were removed using a chemical method involving a mixture of concentrated sulfuric and nitric acids in a 1:3 ratio. Silicon dioxide impurities were removed via a transport reaction facilitated by gas convection. As a result of this two-stage purification, ultra-pure carbon consisting solely of carbon atoms (C–C–C–) was obtained. **Conclusion.** The proposed experimental setup and technological scheme for impurity removal and carbon purification – including the use of transport reactions – enable industrial-scale production of ultra-pure carbon from coal. This purified carbon can be used as a component in advanced construction nanomaterials. The use of such materials significantly enhances the performance characteristics of construction structures and coatings, while also reducing the environmental impact of combustion by-products, ultimately lowering costs associated with environmental protection.

KEYWORDS: Nanotechnology, ultra-pure carbon, nanomaterials, graphene, carbon nanotubes, construction, milling, grinder, sieve, pyrolysis, brown coal, reactor, volatile gases, washing, neutralization, pH environment, purification, impurities, transport reaction, bituminous coal, coke, gas convection, filtration, drying

FOR CITATION:

Aldasheva N.T., Childebaev B.S., Suyunbekova A.S., Dyachkov Y.A., Tashpolotov Y. Development of new methods for energy technology processing of Kyrgyzstan coals. *Nanotechnologies in Construction*. 2026;18(1):42–53. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-6-42-53>. – EDN: NEZTYG.

ВВЕДЕНИЕ

Углеродные нанотехнологии в строительстве – это перспективное направление материаловедения и инженерии, в котором применяются наноматериалы на основе чистого углерода: графена, углеродных нанотрубок (УНТ), фуллеренов, наноалмазов и др. Эти материалы обладают уникальными свойствами, что позволяет значительно улучшать характеристики строительных конструкций и покрытий. Угле-

родные наноматериалы используются для создания самодиагностирующихся строительных материалов, способных обнаруживать повреждения на ранней стадии [1]. Эти материалы обладают уникальными свойствами, что позволяет значительно улучшать характеристики строительных конструкций и покрытий.

Углеродные волокна (карбон, CFRP – Carbon Fiber Reinforced Polymer) обладают легкостью, прочностью и устойчивы к коррозии, поэтому применя-

ются в строительстве для армирования бетона (в качестве замены стали), для усиления конструкций (старые мосты, колонны, балки, плиты), используются в фасадных панелях и элементах интерьера, обладают высокой прочностью при низкой массе, нечувствительны к влаге и коррозионно-активным химическим веществам и имеют большой срок эксплуатации (не ржавеют, как металл).

Графен — это монослой атомов углерода, в котором каждый атом связан с тремя соседними, образуя сотовую структуру [2]. Графен, благодаря своей высокой прочности и теплопроводности, используется для улучшения свойств строительных материалов, а также в красках и покрытиях для создания самодиагностирующихся поверхностей. Графен используется в качестве добавки к бетону для повышения его прочности и устойчивости к трещинообразованию [3]. Графен обладает высокой теплопроводностью и прочностью, что делает его перспективным материалом для создания энергоэффективных строительных конструкций [4]. Графеновые покрытия используются для защиты строительных конструкций от коррозии и механических повреждений [5]. Графеновые наноматериалы применяются для создания гибких сенсоров и систем «умного дома», встроенных в строительные материалы [6]. В настоящее время графен пока слишком дорог для массового применения.

Углеродные нанотрубки (УНТ) обладают высокой прочностью и электропроводностью, что позволяет использовать их в настоящее время для армирования бетона и создания самодиагностирующихся конструкций. Добавление УНТ в бетон улучшает его механические свойства и позволяет создавать материалы с функцией самодиагностики повреждений. Углеродные нанотрубки применяются для создания высокопрочных и легких строительных композитов [7]. Углеродные нанотрубки обладают высокой прочностью и электропроводностью, что делает их перспективными для армирования строительных материалов [8]. Добавление углеродных нанотрубок в бетон улучшает его механические свойства и позволяет создавать материалы с функцией самодиагностики повреждений. Углеродные нанотрубки используются для создания антистатических или самодиагностирующих материалов, способных обнаруживать трещины [9, 10]. Наноматериалы с высокой теплопроводностью на основе графена применяются в составе энергосберегающих фасадов и полов с подогревом. Применение графеновых или УНТ-композитов в 3D-печати строительных элементов обеспечивает легкость, гибкость формы и долговечность.

Фуллерены представляют собой замкнутые многогранники, составленные из трех координированных атомов углерода, и обладают уникальными физико-химическими свойствами [11]. Фуллерены

применяются в строительстве для модификации цементных композитов, улучшения их прочности и устойчивости к агрессивным средам [12]. Фуллерены используются в строительстве для создания материалов с улучшенными теплоизоляционными свойствами [13]. Фуллерены способны снижать теплопотери благодаря нанопористой структуре.

Фуллерены и углеродные нанотрубки применяются в качестве добавок к краскам и покрытиям для придания им антикоррозионных и антибактериальных свойств [14]. Фуллерены и углеродные нанотрубки применяются в строительстве для создания материалов с повышенной устойчивостью к ультрафиолетовому излучению [15]. Углеродные наноматериалы обеспечивают покрытиям устойчивость к ультрафиолету, обладают антикоррозионными свойствами, придают антибактериальный эффект и имеют электропроводность (для антистатических или теплозащитных покрытий).

Основными препятствиями и ограничениями к широкому массовому использованию нанотехнологий в строительстве на базе углеродных композиционных материалов являются: их высокая стоимость, технологическая сложность равномерного распределения в матрице, отсутствие массового производственного стандарта, необходимость оценки долговременного экологического воздействия.

Чистый углерод, используемый в нанотехнологиях (например, для производства фуллеренов, графена, углеродных нанотрубок и др.), получают различными методами в зависимости от нужной аллотропной формы. Получение чистого углерода из каменного угля — задача непростая, поскольку уголь представляет собой смесь углерода, летучих веществ, влаги, золы и серы. Чтобы извлечь из него максимально чистый углерод, нужно пройти несколько стадий очистки. Это не всегда приводит к идеальному графиту, но позволяет получить технически чистый аморфный углерод или полукристаллический графитоподобный углерод.

Использование каменного угля для получения чистого углерода имеет ряд преимуществ, особенно в промышленном или ресурсно-ограниченном контексте.

1. Доступность и дешевизна сырья. Каменный уголь — одно из самых дешевых и распространенных углеродсодержащих ископаемых. Он доступен в огромных масштабах по всему миру, особенно в странах с развитой угольной промышленностью (Россия, Китай, Индия, США). Стоимость исходного сырья существенно ниже, чем у чистого графита или синтетических углеродных наноматериалов.

2. Высокое содержание углерода. Качественные сорта каменного угля (например, антрацит) содержат до 92–98% углерода после коксования. Это делает

уголь хорошей основой для получения технически чистого углерода при условии правильной очистки.

3. Устойчивый источник технического углерода. Продукты пиролиза и коксования широко применяются для производства электродов (в металлургии), в аккумуляторах (в форме графита), как углеродные наполнители в строительных и композиционных материалах.

4. Возможность переработки отходов. В некоторых случаях можно использовать низкосортный уголь или даже отходы угледобычи (шлам, мелочь) для производства технического углерода. Это повышает экологичность и рентабельность переработки.

5. Применимость в ряде направлений нанотехнологий. После глубокой очистки и термообработки уголь можно использовать как источник графитоподобного углерода, как материал для активации и получения пористых структур (например, пористый углерод для суперконденсаторов), как катализаторный носитель в химии.

6. Существование готовой инфраструктуры. Во многих странах уже развита промышленная база для коксования, термообработки и химической очистки угля. Это снижает инвестиционные затраты при переходе от сырья к технически пригодному углероду.

Большая часть (более 50%) запасов каменных и бурых углей Центральной Азии находятся на территории Кыргызстана, залегают в его недрах и являются основой его топливно-энергетических ресурсов (ТЭР).

Химический состав и свойства ископаемых углей разнообразны и зависят от условий образования и дальнейшего процесса их метаморфизма.

Метаморфизм углей — это процесс преобразования углей под воздействием геологических факторов, таких как повышение температуры, давления и продолжительности воздействия этих факторов. Этот процесс определяет физические, химические и текстурные характеристики угля, что делает его более углеродистым и изменяет его энергетические свойства.

Залежи ископаемого твердого топлива (сюда не входят сланцы) образуются в результате разложения органической массы, основу которой составляют растения и поэтому являются результатом их разложения. По «возрасту» самым молодым среди различных видов ископаемого топлива является торф. Залежи его представляют собой плотную массу, получившуюся в результате гниения остатков болотных растений. Залежи бурого угля относятся к более раннему временному периоду образования и поэтому относятся к следующим, более старшим по возрасту образованиям, представляющим собой однородную массу от землянистого до черного цвета. Длительное нахождение бурого угля на открытом воздухе приводит к его частичному окислению (выветриванию)

и, как следствие, к превращению его в порошок (порошкообразное состояние). Залежи каменного угля по времени образования являются более старшими по отношению к времени образования бурого угля и имеют более высокую прочность и меньшую пористость. Старейшие из каменных углей представляют собой антрациты, органическая масса которых претерпела максимальное изменение (более чем на 90%). Антрациты на 93% состоят из углерода, придающего им высокую твердость и прочность.

Рассматривая топливо в качестве материала, горючие свойства которого определяются его составом и структурой в сухом состоянии при отсутствии золы, используют верхний индекс «daf»*, учитывающий состав веществ, входящих в его органическую массу, включая колчеданную серу, которая сгорает с ней. Химический состав любого твердого топлива довольно сложен, разнообразен и, как правило, неизвестен, поэтому для его характеристики используют суммарное массовое содержание элементов, входящих в его состав, которые можно определить, проведя элементарный анализ.

Из проведенного элементарного анализа получаем:

$$C^{daf} + H^{daf} + O^{daf} + N^{daf} + S_c^{daf} = 100 \%. \quad (1)$$

Процесс горения в органическом топливе происходит за счет сгорания химических веществ (углерод, водород и сера), входящих в его состав и находящихся в нем в свободном и связанном состояниях. Возраст топлива определяется и характеризуется изменением процентного содержания ряда химических элементов, входящих в его состав. Так, увеличение возраста топлива приводит к увеличению процентного содержания углерода в нем от 40% у древесины до 93% у антрацита, при этом процентное содержание водорода в нем незначительно уменьшается на величину от 6% до 2%. Все остальные химические элементы, входящие в состав топлива, такие, как кислород, находятся в нем в виде сложных органических соединений. При этом прослеживается следующая закономерность: чем больше кислорода входит в состав топлива, тем большее количество водорода и углерода в топливе вступают в химическую связь с кислородом и становятся химически связанными с ним, то есть окисляются и считаются фактически сгоревшими, что, в конечном итоге, приводит к уменьшению выделяемой теплоты на единицу массы при сжигании такого «обогащенного» кислородом топлива. При этом увеличение возраста топлива ведет к уменьшению процентного содержания в нем кислорода: от 42% у древесины до 2% у антрацита.

При правильном сжигании с поступлением достаточного объема воздуха полное сгорание 1 кг угле-

рода сопровождается выделением 32,8 МДж теплоты и образованием практически безвредного газа, выделяющегося в виде диоксида углерода CO_2 .

Если процесс сжигания топлива организован неправильно и не обеспечивает достаточного поступления объема воздуха, то горение 1 кг углерода сопровождается выделением только 9,2 МДж теплоты с образованием очень токсичного газа в виде оксида углерода CO .

Сера также является составной частью твердых топлив, и ее процентное содержание в их органической массе неодинаково, не зависит от возраста угля и варьируется между различными типами углей и определяется их месторождениями. Горение серы в составе твердых топлив сопровождается образованием небольшого количества токсичного сернистого ангидрида SO_2 и выделением серного ангидрида SO_3 , обладающего еще большей степенью токсичности.

Азот в составе твердого топлива является наиболее вредным из его компонентов. Процентное содержание его в сухом беззольном топливе небольшое и чаще всего колеблется в пределах до 2% от его общей массы. Горение азотсодержащих соединений сопровождается выделением высокотоксичных веществ в виде оксида азота NO и диоксида азота NO_2 , которые могут образовываться и из азота, содержащегося в атмосфере, при температурах, превышающих 1200 °С.

Выбросы токсичных продуктов сгорания серы и азота являются причиной загрязнения воздуха и всей окружающей среды в целом. Сжигаемое в технических устройствах топливо характеризуется его рабочим состоянием, для этого используют верхний индекс «г». Состав любого твердого топлива включает в себя наличие золы A и влаги W , входящие в балласт топлива:

$$C^g + H^g + O^g + N^g + S^g + A^g + W^g = 100\%. \quad (2)$$

Состав сухих компонентов топлива:

$$C^d + H^d + O^d + N^d + S^d + A^d = 100\%. \quad (3)$$

Зола состоит из минеральных примесей, которые попали в пласты топлива с водой и ветром в процессе их формирования, а также небольшого количества минеральных веществ (до 1–2%), содержащихся ранее в растениях, из которых в дальнейшем было сформировано топливо. Зола также содержит частицы различных пород, попавших в топливо при его добыче.

Существующие санитарные нормы предписывают обязательное улавливание и утилизацию золы, которая образуется в результате сжигания твердого топлива. Транспортировка золы в отвалы и специ-

ально отведенные места ее утилизации делает производственный процесс более сложным и дорогим, поэтому наиболее рациональным будет использовать ее в народном и сельском хозяйстве в качестве добавки в цемент, а так же для раскисления и обогащения минеральными веществами почвы и др.

Зольность углей можно значительно уменьшить за счет так называемого обогащения, поскольку основная доля золы практически не имеет устойчивой связи с органической составляющей углей. Для этого необходимо отделить из углей пустую породу, что характеризуется достаточной дороговизной этого процесса, и поэтому в энергетической отрасли обогащение применяется только для углей, подвергающихся коксованию.

Процесс разложения органической массы в углях в результате нагревания их при отсутствии кислорода сопровождается образованием газов, водяных и смоляных паров, а также неорганических остатков, содержащих углерод. При этом наблюдается прямолинейная зависимость между температурой и временем выдержки и суммарным количеством выделившихся при нагреве летучих веществ (рассматривается как наиболее важная характеристика топлива), которая, в свою очередь, имеет обратно пропорциональную зависимость от возраста углей (уменьшается, когда увеличивается их возраст). При нагревании углей органическая составляющая их массы разлагается и проходит несколько стадий трансформации, на которых она может принимать вязкую, текучую и пластичную формы состояния. Дальнейший нагрев и разложение пластичной массы ведут снова к ее затвердеванию. Наличие или отсутствие процесса пластификации угля, а также степень пластификации, связанная с его сортом, определяют физические и химические свойства коксового остатка, который может быть двух видов: плотным спекшимся или рыхлым рассыпающимся. Угли, относящиеся к первому виду, входят в разряд коксующихся, применяющихся в металлургии. Запасы их в природе не велики и используются в качестве сырья для получения металлургического кокса.

Состав и количество минеральных примесей угля определяется по зольному остатку, образующегося после прокаливания навески угля.

Зольность угля не зависит от степени углефикации и может колебаться в широком диапазоне. Источником минеральных примесей в угле являются минеральные вещества исходного растительного материала: минеральные наносы, попавшие в процессе углеобразования, или порода, попавшая в процессе угледобычи.

В состав угля входят как органические, так и неорганические компоненты, содержащие в себе со-

единения фосфора, мышьяка, воду, серу и другие различные минеральные примеси. Основную часть угольной золы составляют окислы кремния и различных металлов, таких как железо, алюминий, кальций, магний и др.

В настоящее время на территории Кыргызской Республики объем балансовых запасов углей, имеющих глубину залегания до 600 метров от поверхности, составляет 1303,5 млн т, причем суммарный объем прогнозируемых ресурсов и балансовых запасов углей оценивается порядка 6391 млн т. 20% балансовых запасов углей Кыргызстана (порядка 1 млрд т) разведаны по категориям А+В+С1, а более 3,12 млрд т – по категории С2 [16,17], причем залежи бурого угля составляют наибольшую часть от объема всех угольных запасов Кыргызстана. Месторождения Кара-Кече и Мин-Куш относятся к основным крупным месторождениям бурого угля на севере Республики с суммарным объемом запасов 557,1 млн т, из которых 438,1 млн т составляют запасы месторождения Кара-Кече (из них карьерные – 194 610 тыс. т, подземные – 243 390,1 тыс. т) и 118,99 млн т – запасы месторождения Мин-Куш (с предельным коэффициентом вскрыши К-19). Но все же основная часть залежей бурого угля находится на юге Республики и составляет наибольший объем от всех имеющихся в стране запасов. Они сосредоточены на таких имеющих наиболее крупные угольные запасы месторождениях, как Сулюктинское – 113,9 млн т, Шурабское – 140,335 млн т, Беш-Бурханское – 38,124 млн т, Кызыл-Кийское – 88,221 млн т, Алмалыкское – 19,29 млн т, Бел-Алманское – 90,1 млн т. Залежи южных месторождений Кок-Янгака, Таш-Кумыра, Джергалана, Кара-Тыты и Тегенка отличаются добываемыми на них энергетическими сортами углей, такими как длиннопламенные и газовые каменные угли. Узгенский бассейн содержит залежи с антрацитом и коксующимися углями, однако в настоящее время еще нет их промышленной добычи.

Разработка новых способов энерготехнологической переработки углей предполагает применение системного подхода к изучению и комбинированию используемых процессов, разработки технологии и оборудования для получения новых продуктов из угля [18].

К современному процессу переработки углей путем нагревания их до температур 400–1200 °С без доступа воздуха относится пиролиз. Данный процесс сопровождается двумя видами реакций:

1) реакциями термического разложения, когда под действием температур органическая масса угля, состоящая из сложных органических соединений, разлагается, в результате чего образуются менее сложные вещества;

2) реакциями поликонденсации, в результате которых происходит образование высокомолекуляр-

ных органических соединений, таких как различные виды смол, которые, превращаясь в газообразное состояние, выделяются из нагретой области.

В процессе пиролиза угли проходят несколько его этапов (стадий).

Начальный этап пиролиза протекает при постепенном повышении температуры от первоначальных ее значений до 300 °С и характеризуется выделением из углей при достижении диапазона температур 100–110 °С физико-химической влаги и части сорбированных газов (O_2 ; CH_4 ; CO_2 ; N_2 и др.).

Следующий этап пиролиза – происходящий при изменении температуры в диапазоне 300–550 °С. Этап характеризуется более глубокими изменениями, происходящими с органической массой угля. На этом этапе происходит выделение паров большинства различных смол и газов с образованием пластической массы. При дальнейшем изменении температуры в данном диапазоне полученная пластическая масса превращается в первичный твердый остаток (полукокс).

На конечном этапе пиролиза при достижении диапазона температур 550–1000 (1200 °С) происходит полная остановка выделения газов из полученного нелетучего остатка. В процессе термического разложения не весь углерод топлива переходит в летучие вещества. Оставшийся после термического разложения углерод вместе с минеральными примесями образует твердый нелетучий остаток – кокс [11].

Конечным результатом пиролиза угля является полученный (оставшийся) нелетучий остаток, а сам пиролиз – основным способом получения из угля, путем его переработки, высококачественного топлива – кокса и полукокса.

В зависимости от диапазона температур, при которых происходит преобразование углей, выделяют два способа пиролиза углей: полукоксование и коксование. Коксование представляет собой высокотемпературный пиролиз, протекающий в высокотемпературном диапазоне при 950–1000 °С. Полукоксование представляет собой пиролиз, протекающий в более низком интервале температур и разделяется на два вида: среднетемпературное – в интервале 650–750 °С, низкотемпературное – в диапазоне 450–500 °С [12].

В настоящее время за рубежом проводятся активные исследования в области пиролиза различных видов твердых топлив и разрабатываются новые способы полукоксования [11].

Нагрев твердого топлива приводит к термическому разложению термически нестойких молекул органических веществ, а также к разрыву и разрушению углеводородистых соединений, входящих в состав горючей массы, сопровождающихся выделением ряда горючих (CH_4 , CO , H_2) и негорючих (O_2 , CO_2 , N_2 ,

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

SO₂) газов, представляющих собой летучие вещества и соединения. Само топливо не обладает летучими веществами, так как они являются продуктами его термического распада. Это обстоятельство позволяет заключить, что летучим веществам свойственен выход из топлива, а не содержание в нем.

Для определения выхода летучих веществ экспериментальным способом необходимо навеску с исследуемой пробой топлива поместить в муфельную печь и выдержать ее (навеску) в ней (в печи) без доступа воздуха, поддерживая интервал температур в печи 830–870 °С [14]. При этом необходимо жестко регламентировать продолжительность времени, условия нагрева и температурный режим исследуемого топлива, непосредственно влияющих на процесс образования и выделения исследуемых летучих веществ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исходным сырьем для исследования являются угли южного региона Кыргызстана, месторождения Кожокелен, Сарымогол, Кичи-Алай Алайского бассейна и месторождения Чангент Узгенского бассейна.

Для определения выхода летучих веществ проба должна быть сухой. Исходный исследуемый уголь массой 1000 г был помещен в нагреваемый герметичный реактор для пиролиза, выполненный в горизонтальном исполнении из нержавеющей стали. Реактор с исследуемым углем помещали в контактную трубчатую электропечь (рис. 1). Для термодеструкции исследуемого угольного сырья реактор с углем нагревали в печи до необходимой температуры.

Используемый в эксперименте реактор для проведения исследования пиролиза исходного угольного сырья является многофункциональным и позволяет обеспечить необходимую точность регулирования режимов работы всего экспериментального устройства,



Рис. 1. Электропечь

что обеспечивает наиболее полную эффективную комплексную переработку исследуемого сырья с целью получения жидких и газообразных продуктов его распада в виде выделившихся в результате пиролиза жидкой смолы, пиролизного газа и кокса (рис. 2). Для этого установку дополнили реактором термокаталитической очистки, холодильником и сборником жидких продуктов. Холодильник предназначен для конденсации летучих продуктов пиролиза в сборнике жидких продуктов. Для определения расхода и количества полученных в результате пиролиза летучих (газообразных) продуктов распада экспериментальную установку дополнили блоком анализа расхода пиролизного газа. Объектами исследования являлись бурый и каменный угли.

Пиролиз бурого угля проводили в диапазоне температур 100–550 °С, а каменного угля – при 100–1100 °С до полного прекращения выделения жидких и газообразных продуктов.

Для исследования термической обработки в реактор было загружено 1000 г исследуемого бурого угля. В ходе эксперимента на этапе начальной стадии процесса полукоксования в интервале температур 100–110 °С из угля выделилась физико-химическая влага и часть сорбированных газов. При дальнейшем нагреве исследуемого угольного сырья в интервале температур 300–550 °С произошли более глубокие физические и химические изменения органической массы угля, сопровождающиеся выделением паров смолы, газа и образованием пластической массы.

Время пиролиза составляло от 65 до 80 минут. Скорость нагрева до температуры 1000 °С в среднем составляла 12–15 °С/мин.

Определение количественного и качественного содержания газов проводили электрохимическим методом (ГСПК 02.00.00.000 РЭ) [15] с применением газоанализаторов различных модификаций, имеющих селективный характер:



Рис. 2. Полученные в результате пиролиза угля пиrogenетическая вода, смола и газы

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

- «Сигнал-4N» определяет содержание только окиси азота;
- «Сигнал-4Э» определяет содержание только сероводорода;
- «Сигнал-4» определяет содержание окиси углерода и метана;
- «Сигнал-4M SO₂» определяет содержание двуокиси серы и сумму углеводородов (C₁–C₁₂).

Определение двуокиси углерода проводилось с помощью индикаторных трубок.

Расчет концентрации углекислого газа в объемных долях % в мг/м³ производился по формуле [16, 17]:

$$X = \frac{M \cdot a \cdot n \cdot 1000}{22,4}, \quad (4)$$

где X₁ – концентрация газа в объемных долях, %;
M – молярная масса углекислого газа (M_{CO₂} = 44);
a – количество вещества, найденное в 1 л воздуха;
n – количество качков махового насоса;
22,4 – объем 1 г молекулы газа,

$$X_1 = \frac{44 \cdot 0,0006 \cdot 2 \cdot 1000}{22,4} = 2,3\%,$$

$$X_2 = \frac{44 \cdot 0,00052 \cdot 1 \cdot 1000}{22,4} = 1,0\%.$$

Результаты расчетов показали, что содержание углекислого газа в составе коксового газа бурого угля составляет 2,3%, а каменного угля 1%. Результаты эксперимента по исследованию содержания газов (летучих веществ) в бурых углях в интервале температур 110–550 °С, (мг/м³) приведены в табл. 1.

В процессе пиролиза бурых углей образуется 61,9% летучих веществ, твердый остаток – кокс 36% и жидкие вещества 2,1% (смола и пирогенетическая вода). Экспериментальные данные по определению содержания газов (летучих веществ) каменных углей при 250–1100 °С (мг/м³) приведены в табл. 2 и на рис. 4.

В процессе пиролиза каменных углей образуется 15,5% летучих веществ, твердый остаток – кокс 83%

и жидкое вещество – 1,5% (смола и пирогенетическая вода).

Экспериментальные данные по определению температуры начала выхода летучих веществ и количества их выхода приведены в табл. 3.

ПОЛУЧЕНИЕ ЧИСТОГО УГЛЕРОДА

Применение чистого углерода в строительстве – тема, которая охватывает, в основном, разновидности углерода с особыми свойствами, такими как углеродные волокна, графен и алмазоподобный углерод (DLC).

Известно, что в угле содержится значительное количество углерода, который при обычных условиях химически инертен. В более чистом состоянии углерод в природе встречается в виде простых веществ в кристаллическом состоянии в виде графита и алмаза. Физические свойства графита значительно отличаются от физических свойств алмаза.

Искусственно произведенный графит является основным конструкционным материалом для ядерных реакторов. Искусственным путем графит получают путем нагрева спрессованной смеси, состоящей из нефтяного кокса и каменноугольной смолы. Вначале смесь нагревают до температуры 1500 °С, затем нагрев производят до 2750 °С, после чего медленно ее охлаждают. В полученных таким методом искусственных графитах зольность не превышает тысячных долей процента [18].

Графит представляет собой вещество с плотностью 2,2 г/см³, имеющее серовато-черный цвет. Особенности физических свойств графита являются низкая твердость и относительная мягкость, приводящие при трении к его расслаиванию, что позволяет ему оставлять свинцово-серые следы на поверхности различных твердых материалов. Учитывая эти свойства, графит широко используют для изготовления карандашей.

Различия в строении кристаллических решеток алмаза и графита обуславливают различие в их свойствах, таких как электропроводность, твердость, температура плавления и др. Рентгенографические

Таблица 1. Результаты эксперимента по исследованию содержания газов

Газоанализаторы модификации	NO	H ₂ S	SO ₂	CO	CH ₄	CO ₂	C ₁ –C ₁₂ (сумма углеводородов) Этан, пропан, бутан, пентан, этилен, пропилен, бутилен, бензол, толуол, ксилол и др.	
1.«Сигнал-4»	2,0	–	–	–	–		29	
2.«Сигнал-4»	–	–	–	7,4	20			
3.«Сигнал-4Э»	–	0,4	–	–	–			
4.«Сигнал-4M-SO ₂ »	–	–	0,8	–	–	2,3		
Итого в %	2,0	0,4	0,8	7,4	20	2,3	29	61,9

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

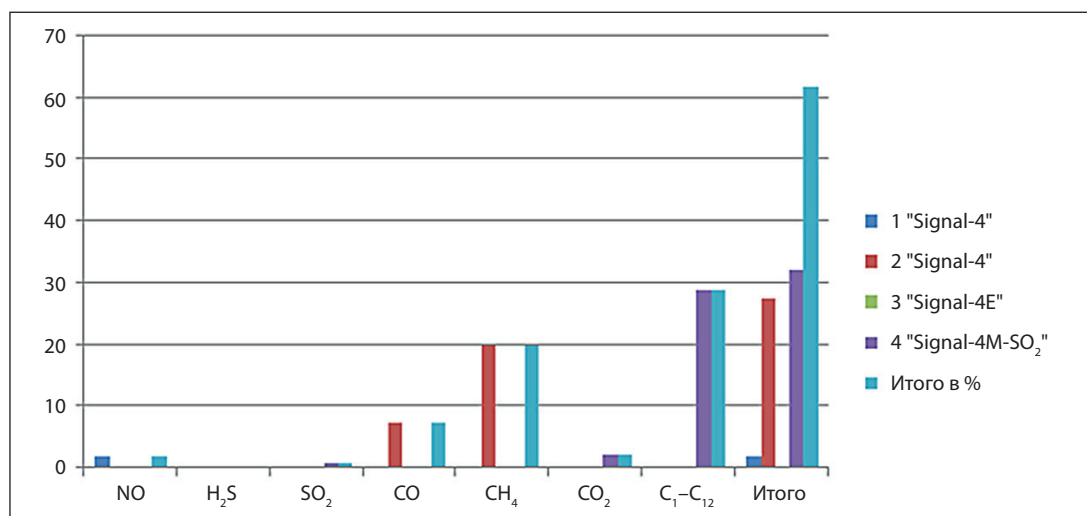


Рис. 3. Гистограмма результатов эксперимента по исследованию летучих веществ в бурых углях в интервале температур 110–550 °С (мг/м³)

Таблица 2. Содержание газов в каменных углях

Газоанализаторы модификации	NO	H ₂ S	SO ₂	CO	CH ₄	CO ₂	C ₁ -C ₁₂ (сумма углеводородов) Этан, пропан, бутан, пентан, этилен, пропилен, бутилен, бензол, толуол, ксилол и др.	
1. «Сигнал-4»	0,2	–	–	–	–	–	5,05	
2. «Сигнал-4»	–	–	–	1,5	7	–		
3. «Сигнал-4Э»	–	0,15	–	–	–	–		
4. «Сигнал-4М-SO ₂ »	–	–	0,6	–	–	1,0		
Итого в %	0,2	0,15	0,6	1,5	7	1,0	5,05	15,5

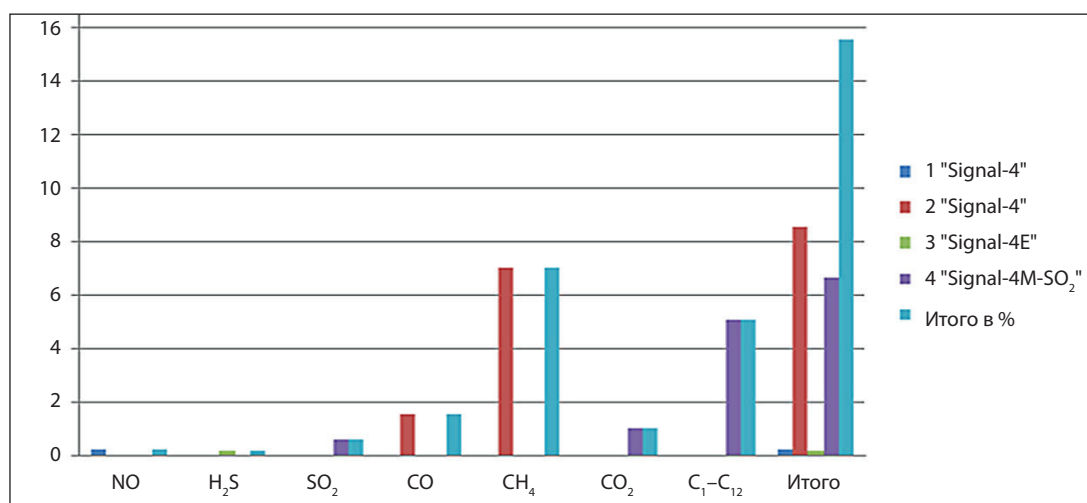


Рис. 4. Гистограмма экспериментальных данных по определению содержания газов (летучих веществ) каменных углей при 250–1100 °С, (мг/м³)

исследования алмаза указывают на одинаковые расстояния (1,545Å) между атомами углерода в его кристаллах. Превращение графита в алмаз проис-

ходит при условии возрастания температуры при постоянном неизменном давлении, при этом температура возгонки – 3470 °С, температура плавления –

Таблица 3. Температуры начала выхода летучих веществ и их количества

Вид топлива	Выход летучих $V^{daf}, \%$	Температура начала выхода летучих, °С
1. Бурые угли	61,9	150–170
2. Каменные угли	15,5	380–400

3570 °С, теплота плавления графита при давлении 47 тыс. атм составляет 25 ккал/г·атом [19].

Относительно небольшая величина теплоты плавления графита указывает на тот факт, что при плавлении происходит только частичный разрыв части связей кристаллической решетки. Теплота сгорания углерода составляет порядка 94 ккал/г·атом., при этом в состав его паров входят как отдельные атомы углерода, так и более сложные образования C_n . Дальнейшее повышение температуры приводит к увеличению средней величины n , что говорит об обогащении пара посредством более сложных молекул, относящихся к типу С–С–С–С, при этом значение энергии диссоциации составляет 144 ккал/моль, С=C, С=C=C=C и т.д. При расчете энергий углеродных связей используют теплоту возгонки углерода при температуре 250 °С, равную 171 ккал/г атом. Считается, что если к графиту в течение нескольких секунд приложить давление в 700 тыс. атм., то возможно образование новой твердой фазы с плотностью, превышающей плотность алмаза.

Углерод получают термическим разложением – пиролизом метана (при высокой температуре):



Известно, что линейный полимер углерода, содержащий до 99% углерода, названный карбином, был синтезирован академиком В. В. Коршаковым при каталитическом окислении ацетилена C_2H_2 [20].

Углерод, содержащий аллотропное (углерод С60) вещество фуллерен, получают электродуговым методом, в виде сажи. Затем этот фуллерен вымывают из сажи экстрагированным раствором [21].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Измельчили каменный уголь Узгенского бассейна с целью очистки его от входящих в его состав примесей, используя для этого шнековую дробилку и шаровую мельницу. Используя латунное сито с размерами ячеек 0,04 мм, произвели просеивание через него полученного порошка. Отвесив 1000 г просеянного порошка, смешали его со 100 г смеси азотной и соляной кислоты в пропорции 1:3., после чего оставили постоять 30 минут. После этого про-

извели промывку очищенной анализируемой пробы в дистиллированной воде. Затем, профильтровав полученную пробу через хлопчатобумажную ткань, получили очищенный от примесей металлов остаток каменноугольного порошка, который просушили в сушильном шкафу при температуре 110 °С до приобретения им постоянного веса.

Для удаления влаги, органических веществ и газов из сырья каменноугольный порошок загрузили в пиролизный реактор и нагревали от 20 до 1000 °С:

- на первом этапе, при температуре до 260 °С, из исследуемой пробы выделилась влага;
- на втором этапе, в диапазоне температур от 280 до 387 °С, выделились жидкие (темно-коричневый раствор) и газообразные вещества;
- на третьем этапе, в диапазоне температур от 400 до 1000 °С, выделились газы и пиролиз закончился, в реакторе остается уголь.

Используя метод транспортных реакций с конвекцией газов, очистили каменноугольный порошок от примесей кремния, кальция и др. [16].

Вид экспериментальной установки для ускорения процесса конвекции показан на рис. 5.

Для сборки экспериментальной установки используются шлифы. Установка изготавливается из кварца. Состав переносящих газов должен быть максимально чистым. Перед началом эксперимента необходимо прокалить кварц-лодочки. При транспортировке газов при температуре до 950 °С установка изготавливается из тугоплавкого стекла. Поместив лодочки (4) с находящимся в них очищаемым веществом и открыв вентили (1), (5), проводим вакуумирование установки. Этот процесс может сопровождаться с незначительным испарением вещества в емкость (4), при помощи которой осуществляется транспортировка этого вещества. Закончив процесс вакуумирования установки, посредством открытия вентилей – 1 подаем внутрь системы соответствующий газ.

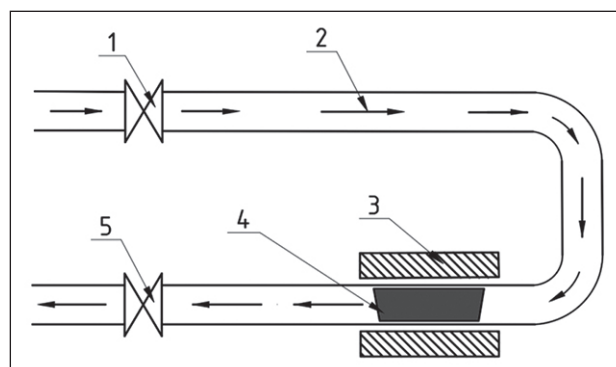


Рис 5. Конвекция газов в экспериментальной установке: 1, 5 – вентили; 2 – направление конвекции газов (йоода); 3 – электрическая печь; 4 – кювета с очищенным веществом

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

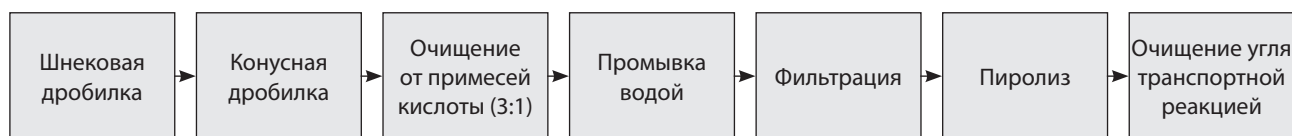
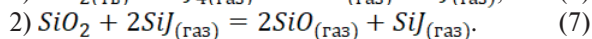
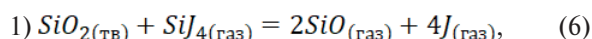
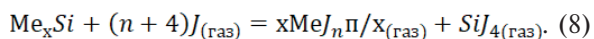


Рис. 6. Технологическая схема очищения угля от примесей: 1 – шнековая дробилка; 2 – конусная дробилка; 3 – очищение угля от примесей с применением азотно – соляной кислоты (3:1); 4 – промывка водой; 5 – фильтрация; 6 – пиролиз, очищение угля от воды, органических веществ и летучих газов; 7 – очищение угля от кремния и других металлов

ющий индифферентный йод – 2. Затем включаем электрическую печь – 3 и при закрытых вентилях нагреваем емкость – 4 с веществом для транспорта. В процессе транспортных реакций удаляются летучие газообразные вещества и происходят следующие одновременно протекающие реакции:



С применением йода транспортной реакцией можно очистить исследуемый уголь от таких металлов, как *Ni, Fe, Cr, Ti, Hf, V, Ta* и т.д.



ВЫВОДЫ

1. Хотя каменный уголь не является идеальным сырьем для получения высокоупорядоченных углеродных наноматериалов (как графен или нанотрубки), он остается эффективным и экономичным источником технически чистого углерода, особенно в металлургии, при производстве активированного угля, в создании углеродных композитов, в дешевых углеродных электродах. Если цель – массовое производство углерода с приемлемой чистотой, каменный уголь – хорошая альтернатива синтетическим методам.

2. Экспериментальные данные проведенных нами исследований по определению количественного и качественного состава и содержания газов в бу-

рых и каменных углях месторождений Кыргызстана показывают, что:

- горючие газы (метан, окись азота, сероводород, окись углерода, сумма углеводородов) бурых углей составляют 58,8%, а каменных углей составляют 13,9%;
- негорючие газы (углекислый газ, двуокись серы) бурых углей 2,8%, а каменных углей 1,6%;
- в процессе пиролиза бурых углей образуется 61,9% летучих веществ, твердый остаток – кокс 36% и жидкое вещество 2,1% (смола и пирогенетическая вода);
- в процессе пиролиза каменных углей образуется 15,50% летучих веществ, твердый остаток – кокс 83% и жидкое вещество – 1,5% (смола и пирогенетическая вода).

3. Для очищения угля от примесей металлов использовали концентрированную азотно-соляную кислоту в соотношении 1:3.

4. В процессе пиролиза от 100 до 850 °С из состава угля удаляются пирогенетическая вода (в ней содержится аммиачная вода, бензол, толуол, парафин, уксусная кислота и др.), летучие газообразные вещества и смола. В реакторе остается только чистый уголь.

5. После пиролиза в составе угля остается оксид кремния (SiO_2), очищение от которого происходит в ходе транспортной реакции с применением йода, за счет конвекции газов.

6. Последовательным очищением угля получаем особо чистое однородное вещество – чистый углерод, который содержит только атомы углерода.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Новоселов К.С., Гейм А.К. Двумерный кристалл графена УФН. 2007;177(8):863–884.
2. Гейм А.К., Новоселов К.С. Графен: статус и перспективы. Успехи физических наук. 2009;179(7):777-797.
3. Раков Э.Г. Нанотрубки и фуллерены. М.: Университетская книга, 2006;181–187.
4. Харрис П.Дж. Углеродные нанотрубки и родственные структуры. Техносфера, 2003;312-314.
5. Кротков Р.В., Горбунов В.А. Фуллерены и их применение. М.: Лаборатория знаний, 2006.
6. Мищенко С.В., Ткачев А.Г. Углеродные наноматериалы: производство, свойства, применение. М.: Машиностроение, 2008;94-97.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

7. Матыгина З.А., Шур Д.В., Загинайченко С.Ю. Углеродные наноматериалы и фазовые превращения в них. Днепропетровск: Наука и образование, 2007;73-78.
8. Елецкий А.В. Углеродные нанотрубки и фуллерены в нанотехнологии. УФН. 1997;167(9):945-972.
9. Лозовик Ю.Е., Попов А.М. Образование и рост углеродных наноструктур: фуллерены, наночастицы, нанотрубки и конусы. УФН. 1997;167(7):751-774.
10. Асанов А.А. Переработка угля – основы новых технологий энергетики Кыргызстана. Бишкек ИЦ «Техник». 2011;215.
11. Школлер М.Б. Полукоксование каменных и бурых углей. М.Б. Школлер Новокузнецк: Инженерная академия России, Кузбасский филиал, 2001;232.
12. Каирбеков А.Г. и др. Комплексная переработка бурых углей центрального Казахстана. Алматы: КазГУ, 2014;278.
13. Асанов А.А. Энергоэффективное использование углей Кыргызстана. Бишкек: 2018;298.
14. Жамалуева А.А. Топлива и теория горения. Грозный: ГГНТУ, 2021;70.
15. Маркировка газоанализатора соответствует конструкторской документации ГСПК 02.00.00.000 РЭ и ГОСТ 12.2.020.-76.3.3.2.
16. Минерально-сырьевая база Кыргызской Республики на рубеже перехода к рыночной экономике / Госагенство по геологии и минеральным ресурсам КР. Бишкек.1998;233.
17. Сопуев Т.С. Угольные месторождения Кыргызской Республики. Справочник. Бишкек,1996.
18. Сиенко М.Ж., Плейн Р.А., Хестер Р.Е. Структурная неорганическая химия М: Издательство «Мир», 1986;345.
19. Некрасов Б.В. Основы общей химии М: Высшая школа, 1967;408.
20. Павлов Н.Н. Неорганическая химия М: Высшая школа, 1986;336.
21. Горичев И.Г., Зайцев Б.Е., Кипрянов Н.А. Руководство по неорганическому синтезу. Учебное пособие для ВУЗов. Издательство «Химия».1997;320.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Алдашева Нуржамал Тунаевна – кандидат технических наук, доцент, кафедра «Электрооборудование и теплоэнергетика», Ошский технологический университет имени М.М. Адышева, Институт природных ресурсов имени А.С. Джаманбаева Южного отделения НАН КР, Ош, Кыргызская Республика, aldasheva73.20@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6549-0421>

Чилдебаев Бактыбек Суюнбекович – доцент, кафедра «Электрооборудование и теплоэнергетика», Ошский технологический университет имени М.М. Адышева, Ош, Кыргызская Республика, 64bakyt@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-4178-7486>

Суйунбекова Айшакан Суйунбековна – кандидат химических наук, профессор, Ошский Государственный университет, Ош, Кыргызская Республика, aysha53.02@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-6508-5664>

Дьячков Юрий Анатольевич – старший преподаватель, кафедра «Электрооборудование и теплоэнергетика», Ошский технологический университет имени М.М. Адышева, Ош, Кыргызская Республика, yuriy@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-7770-1097>

Ташполотов Ысламидин – доктор физико-математических наук, профессор, Ошский государственный университет, Ош, Кыргызская Республика, itashpolotov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9293-7885>, SPIN-код 2425-6716

ВКЛАД АВТОРОВ

Алдашева Н.Т. – научное руководство, концепция исследования, формулирование итоговых выводов и заключения.

Чилдебаев Б.С. – проведение экспериментальной части, участие в разработке концепции исследования.

Суйунбекова А.С. – научное редактирование текста, подготовка итоговых выводов.

Дьячков Ю.А. – сбор материала по литературным источникам.

Ташполотов Ы. – научная консультация.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 30.04.2025; одобрена после рецензирования 11.10.2025; принята к публикации 09.12.2025.