

ТЕХНИКА ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

УДК 622.234.5, 278,324.5

**КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СКВАЖИННЫХ УГЛЕХИМИЧЕСКИХ
ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СИНТЕТИЧЕСКОГО ТОПЛИВА**

О.С. БРЮХОВЕЦКИЙ, И.Ю. НАЙДЕНКО, Н.Д. МУРАЛЕВ, Л.А. БАЙРАМГУЛОВА

*Российский государственный геологоразведочный университет
117997, Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23, e-mail: bos.rggru@mail.ru*

Исследована проблема добычи и углехимической переработки углей в высокоэффективное и экологически чистое топливо — синтетический газ и синтетическое жидкое топливо. Рассмотрены основные технологии переработки углей — получение водоугольного топлива, гидрогенизация и газификация. Представлен анализ отечественного и зарубежного опыта по методам углехимического передела углей. Авторами предлагается комплексное использование скважинной гидроструйной технологии и подземной газификации угля для отработки маломощных пластов угля и углей низших сортов, а также в труднодоступных и лишенных развитой инфраструктуры регионах совместно с мобильными или компактными установками и заводами углехимического передела. Данная проблема требует дальнейших исследований.

Ключевые слова: синтетический газ; синтетическое жидкое топливо; водоугольное топливо; углехимия; газификация; гидрогенизация; газогенератор.

**THE INTEGRATED USE OF BOREHOLE COAL CHEMICAL TECHNOLOGIES
TO PRODUCE SYNTHETIC FUEL**

O.S. BRYUKHOVETSKIY, I.Y. NAYDENKO, N.D. MURALEV, L.A. BAYRAMGULOVA

*Russian State Geological Prospecting University
117997, Russia, Moscow, Miklouho-Maklay's street, 23; e-mail: bos.rggru@mail.ru*

The problem of coal mining and its processing into the high-effectual and ecologically clean fuel — synthetic gas and synthetic liquid fuel — has been investigated. The main technology of coal processing such as obtaining coal-water fuel, hydrogenation and gasification has been considered. An analysis of foreign and domestic experience for chemical methods of coal redistribution is presented. The products are the synthetic gas and synthetic liquid fuel (petrol, kerosene, diesel and jet fuel). The authors suggest an integrated coal processing technology: hydro-jet borehole technology and underground coal gasification for thin coal seams and low grade coal processing. It is also advisable for distant regions and areas with poor infrastructure. There is a possibility for creation mobile and compact complexes for coal chemical processing.

Keywords: synthetic gas; synthetic liquid fuel; coal-water fuel; coal chemistry; gasification; hydrogenation; gas generator

Из расчёта потребления природных энергоресурсов в 2014 г., мировых подтвержденных запасов нефти хватит примерно на 48 лет, газа на 60 лет, а угля — более чем на 220 лет. Подтвержденные мировые запасы угля составляют 936 млрд. т [3]. Россия занимает 2-е место в мире по запасам угля — 157,9 млрд. т. (16,9 %) после США — 233,7 млрд. т (25,0 %).

В связи с развитием мировой добычи нефти и газа для удовлетворения постоянно растущего спроса на эти энергоресурсы запасы нефти и газа катастрофически быстро истощаются, поэтому востребованность в продуктах углехимии, главным образом в жидком и газообразном топливе, возрастает.

Особое внимание заслуживает переработка углей в жидкое топливо — бензин, керосин, дизельное и реактивное топливо. Связано это в первую очередь с востребованностью удобного в хранении и транспортировании высокоэффективного топлива.

В структуре потребления первичных энергетических ресурсов России уголь занимает всего лишь 18 %, тогда как нефть — 21 %, а газ — 52 % [6].

При этом мировые подтвержденные запасы нефти 249 млрд. т, годовая добыча в 2013 г. составила 4,1 млрд. т [3]. Запасы нефти в России 20,3 млрд. т (8,2 % от мировых и 5-е место по запасам), годовая добыча нефти в 2014 г. в России составила 530 млн. т (12,6 % и 2-е место после Саудовской Аравии — 542,3 млн. т) [3]. Необходимо отметить, что в России все крупные месторождения нефти практически исчерпаны, средний дебит невысок, вовлечение новых месторождений в зоне вечной мерзлоты или на шельфе малорентабельно.

Мировые подтвержденные запасы природного газа, по данным на 2014 г., составили 212,2 трлн. м³, годовая добыча газа в мире — 3,5 трлн. м³. Доля России в запасах природного газа 50,9 трлн. м³ (24 % и 1-е место в мире), годовая добыча 605,0 млрд. м³ (17,5 % и 2-е место после США — 687,6 м³; 19,9%) [3].

Сегодня для России значительно выгоднее и с экономической, и с экологической точек зрения экспортировать большую часть добываемых газа и нефти, так как только эти энергоресурсы в течение последних 25 лет позволяли содержать на высоком уровне бюджет России и в ближайшем будущем ситуация не изменится.

Однако в последние годы в России отмечается дефицит газа (25—30 млрд. м³), и мы закупает газ, чтобы снабжать самих себя и страны, с которыми заключены долгосрочные договоры [6].

В настоящее время в мире востребованы научно-исследовательские работы и строятся заводы по получению синтетического газа из углей для тепловых и энергогенерирующих станций, а также по производству жидкого топлива из углей.

Основные технологии переработки углей хорошо известны и широко применяются во всем мире: коксование, полукоксование, получение водоугольного топлива, гидрогенизация, газификация.

Технология водоугольного топлива (ВУТ) возникла с появлением в 50—60-е гг. прошлого столетия технологий гидротранспорта угля и получила широкое распространение в ряде стран особенно в 80—90-е гг. [5]. Дальнейшее совершенствование технологии (улучшения реологических характеристик водоугольных суспензий и их стабильности) привело к созданию водоугольного топлива.

Водоугольное топливо, водоуголь (ВУТ) — жидкое топливо (суспензия), которое получают путем смешивания измельченного угля, воды и пластификатора. ВУТ используется на теплогенерирующих объектах в основном как альтернатива природному газу и мазуту. ВУТ имеет заданные реологические (вязкость, напряжение сдвига), седиментационные (сохранение однородности в статических и динамических условиях) и топливные (энергетический потенциал, полнота сгорания органических соединений) характеристики. Для водоугольного топлива типичны следующие свойства: температура воспламенения 800—850°C; температура горения 950—150°C, теплотворная способность 3700—4700 ккал. Степень сгорания углерода — более 99 %.

Для приготовления ВУТ используют, как правило, высококачественные энергетические угли с низким содержанием серы и золы — антрацит и другие разновидности каменных углей. Основным недостатком этого топлива является его низкая устойчивость (стабильность), не превышающая в большинстве случаев 1—2 месяцев. Для активизации компонентов применяют современные методы переработки, использующие новые физические процессы. В результате получено топливо с повышенной реакционной способностью, пригодное к хранению без разрушения физико-химической структуры более года (не расслаивается на твердые и жидкие фракции). Это топливо получило название искусственное композитное жидкое топливо — ИКЖТ (технология Новосибирского государственного технического университета и ОАО «Новосибирскэнерго») [5]. Технология ИКЖТ в зависимости от исходных компонентов позволяет получать топливо со следующими характеристиками: высокой калорийностью (до 6000 ккал/кг); высокой стабильностью (сохраняет структуру при хранении не менее 1 года и при транспортировке автомобильным транспортом на расстояния не менее 500 км).

В 2004 г. в пос. Ёнский (Мурманская область) был построен опытно-промышленный центр приготовления ВУТ. В настоящее время ООО «Амальтеа-Сервис» (г. Москва), являющееся резидентом технопарка Сколково, оказывает инжини-

ринговые услуги, поставляет оборудование для приготовления и сжигания ВУТ.

За рубежом водоугольное топливо широко применяют в США, Европе и Азии [5].

Наиболее перспективным направлением получения жидкого топлива из углей является гидрогенизация.

Гидрогенизация — это процесс превращения высокомолекулярных веществ органической массы угля под давлением водорода в жидкие и газообразные продукты при 400—500°C в присутствии различных веществ — органических растворителей, катализаторов и т. д.

При гидрогенизации происходит ожижение исходного продукта и насыщение его водородом. При этом параллельно-последовательно протекают разнообразные реакции, в том числе гидрирование с присоединением водорода, расщепление гидрированных высокомолекулярных веществ на низкомолекулярные, изомеризация, восстановление кислородных, сернистых и азотистых соединений [7]. В результате гидрогенизации высокомолекулярные органические вещества превращаются в смесь низкомолекулярных соединений, насыщенных водородом. В зависимости от условий процесса и глубины превращения органической массы исходного твёрдого топлива гидрогенизация позволяет превращать его в высококачественное моторное горючее (бензин, дизельное и реактивное топливо), котельное топливо и сырьё для органического синтеза, в том числе моно- и полициклические ароматические углеводороды, фенолы, азотистые основания и др.

Наибольший выход жидких продуктов достигается при гидрогенизации углей невысокой стадии метаморфизма (бурых, газовых, длиннопламенных).

Наиболее перспективными и широко используемыми во всем мире являются установки каталитической гидрогенизации углей, отдельной ветвью которой является деструктивная каталитическая гидрогенизация, и гидрогенизация углей по способу высокоскоростного пиролиза [7].

Переработка углей с помощью гидрогенизации весьма перспективна, особенно для относительно дешёвых сибирских углей, добываемых открытым способом. Сейчас около 70% углей в стране добывается открытым способом, через 20—30 лет эта доля, по мнению некоторых специалистов, может увеличиться [6]. Часть угля, в соответствии с энергетической программой России [7], планируется перерабатывать в жидкое топливо, пригодное для транспортировки по трубопроводам на дальние расстояния.

В СССР в 70—80-х гг. интенсивно проводились исследования, опытные и проектно-конструкторские разработки, направленные на создание конкурентоспособного производства жидких топлив-

ных и химических продуктов из бурых и каменных углей, в основном открытой добычи, крупнейших в мире месторождений Канско-Ачинского, Кузнецкого и других угольных бассейнов. Были разработаны научные основы и новая отечественная технология производства жидкого топлива с помощью гидрогенизации угля при давлении водорода 10,0 МПа и температуре 425—435°C, время реагирования на стадии сжижения угля 60 мин., с применением эмульгированного молибденового катализатора, которая прошла апробацию в условиях опытно-промышленного производства на опытном заводе [7].

Разработанная в Государственном ракетном центре имени академика В.П. Макеева, технология производства жидкого топлива из угля коренным образом отличается от традиционной. Главное отличие в том, что здесь нет газовой стадии, как и вредных выбросов, нет необходимости для насыщения угля водородом создавать сверхвысокое давление (не менее 6 МПа) и температуру более 600°C, с добавлением катализатора. Используемое оборудование занимает площадку всего 40 × 40 м [7].

Технология позволяет перерабатывать дешёвый бурый уголь в аналог нефти, а затем в моторное топливо — бензин, дизтопливо и мазут. Себестоимость синтетического горючего втрое меньше, получаемого обычным путём. Особенно высокую отдачу данная технология даёт при малых объёмах производства и её можно использовать даже на Крайнем Севере [7].

Переработка угля является очень энергоёмким процессом, при котором образуются отходы — зола и вредные газы.

Институтом горючих ископаемых (г. Москва) и ГНЦ РФ - ФЭИ (г. Обнинск) совместно с другими организациями ведутся совместные работы по созданию типового атомного энерготехнологического комплекса (АЭТК) для экологически чистого производства синтетического моторного топлива производительностью 500 тыс. т/год и более [7].

Исследования по гидрогенизации углей в настоящее время широко проводятся в Австралии, Великобритании, Германии, Испании, Индонезии, Колумбии, Китайской Народной Республике, Пакистане, США и Японии [7].

Наиболее эффективным с экономической и экологической сторон является преобразование углей методом газификации.

С помощью газификации органическая часть твёрдых горючих ископаемых (углей) превращается в так называемый генераторный газ или синтез-газ. В ходе процесса газификации часть топлива сгорает, а за счёт выделившегося при этом тепла протекают требуемые для газификации эндотермические процессы [1]. Генераторные газы после очистки от H_2S , CS_2 , CO_2 используют как источник водорода в производстве аммиака, метанола и

жидких углеводородов. Сам процесс менее требователен к составу и качеству исходного топлива (содержанию в нём балласта), а также к степени метаморфизма — могут использоваться бурые и каменные угли всех разновидностей.

Синтез-газ до настоящего времени в нашей стране и за рубежом использовался в основном как газообразное топливо при получении тепла и электроэнергии. В 1958 г. в СССР работало 350 газогенераторных станций, на которых было установлено около 2500 газогенераторов разных размеров и конструкций. На этих станциях вырабатывалось в год 35 млрд. м³ энергетического и технологического газов из разных видов топлива, полностью покрывавших потребности отраслей в этом виде топлива [1].

В 1920 г. в Германии Францем Фишером и Гансом Тропшем был разработан процесс преобразования в наземных газогенераторах синтез-газа в синтетическое жидкое топливо (синтез Фишера-Тропша). Особым достоинством продуктов процесса Фишера-Тропша, в отличие от продуктов, полученных из нефти, является практически полное отсутствие в их составе серо- и азотосодержащих соединений и незначительное содержание ароматических углеводородов, что устраняет образование токсичных оксидов серы и азота при сгорании такого моторного топлива в двигателях и тем самым решаются экологические проблемы [1].

В зависимости от условий синтеза и видов катализатора из смеси оксида углерода и водорода можно получать бензин, дизельное топливо, парафин, церезин, а также метанол и высшие спирты, а при взаимодействии синтез-газа с олефинами — альдегиды и спирты.

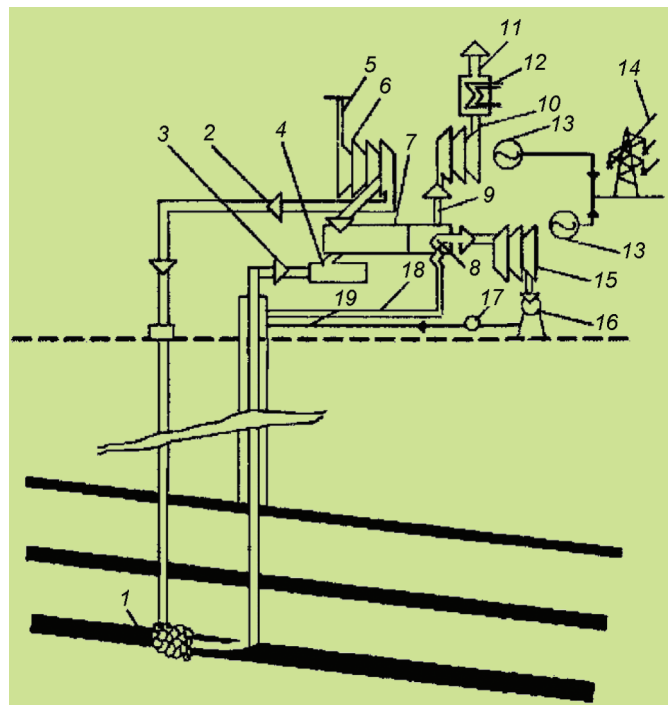
В целом процесс производства топлива из угля в наземных газогенераторах в настоящее время в ряде стран освоено промышленно. Тем не менее главным недостатком процесса является высокая стоимость газогенераторов и значительные затраты на добычу и транспортировку угля к месту переработки.

Перспективным направлением глубокой переработки угля является скважинная технология подземной газификации угля (ПГУ), обеспечивающая осуществление реакций неполного окисления угля в подземных условиях непосредственно в угольных пластах — в подземном газогенераторе, с получением после соответствующей обработки на поверхности газа, сходного по своим характеристикам с природным [1]. На поверхности земли это выглядит, как экологически чистое промышленное производство, которое добывает горючий газ и производит электроэнергию и тепло, и практически ни в каком производственном цикле не наносится ущерб природе. При этом необходимо отметить безопасность и экономическую эффективность: отсутствуют затраты на добычу угля и на дорогостоя-

щее газифицирующее производство на поверхности земли, на землеотведение для добычи угля и для газогенерирующего (газифицирующего) завода.

Суть процесса заключается в подземном сжигании углей при ограниченном доступе кислорода, в результате чего образуется оксид углерода (CO) в большей степени, чем диоксид углерода (CO₂), а также в небольших количествах метан и водород (порядка 1—2 % каждого компонента). Оксид углерода, метан и водород, являясь горючими компонентами, в совокупности образуют горючий газ — синтез-газ, пригодный для промышленного использования в топках котельных и электростанций [1].

Технология подземной газификации состоит в бурении двух скважин до подошвы угольного пласта: одна нагнетательная, через которую подается воздух в камеру сжигания угля, другая отводит генерируемый газ при неполном сжигании угля на поверхность земли, где впоследствии используется по назначению (как газообразное топливо или для производства жидкого топлива). Нагнетательная скважина соединяется с газоотводящей скважиной газопроницаемым каналом. Методы создания каналов газификации различные: огневая фильтрационная сбойка скважин; гидравлический разрыв угольного пласта жидкостью; бурение; электрический; направленный взрыв и др. (рисунок) [1].



Принципиальная схема автономного горно-энергетического комплекса на базе газификации угля: 1 — подземный газогенератор; 2 — сжатый воздух; 3 — низкокалорийный газ; 4 — установка очистки газа; 5 — воздух; 6 — компрессор; 7 — камера сгорания; 8 — пароперегреватель; 9 — дымовые газы с $T 800—850^{\circ}\text{C}$; 10 — газовая турбина; 11 — вытяжная труба; 12 — экономайзер; 13 — генератор переменного тока; 14 — электросеть; 15 — паровая турбина; 16 — конденсатор; 17 — насос; 18 — пар с $T 250^{\circ}\text{C}$; 19 — вода

На забое нагнетательной скважины производят розжиг угольного пласта и с помощью подачи воздуха поддерживается горение угля в пласте, при этом газоотводящая скважина с помощью газового насоса создает необходимое движение генерированной газовой смеси — синтез-газа. Таким образом, две скважины, связанные одним процессом горения, постепенно от нагнетательной скважины до газоотводящей выжигают угольный пласт от подошвы до его кровли. Ширина охвата при этом зависит от физических свойств угля и может достигать нескольких метров.

В 1948—1990 гг. в СССР работали пять опытно-промышленных предприятий ПГУ (три предприятия на бурых углях — Подмосковная и Шатская станции «Подземгаз» в Мосбассе, Ангренская станция «Подземгаз» в Узбекистане, а также два предприятия на каменных углях — Лисичанская станция «Подземгаз» в Донбассе и Южно-Абинская станция «Подземгаз» в Кузбассе). Кроме того, было два кратковременных опыта на каменных углях с низким выходом летучих веществ: в г. Шахты — на антраците (А) и г. Каменске — на полуантраците (ПА). Всего на отечественных предприятиях ПГУ было газифицировано более 15 млн. т угля и получено около 50 млрд. м³ газа, и тем самым продемонстрирована эффективность ПГУ как бесшахтной технологии получения газообразного энергоносителя из угля на месте его залегания [1].

В настоящее время технология подземной (как, впрочем, и наземной) газификации угля развивается на Дальнем Востоке (Дальневосточный государственный технический университет и КГУП «Примтеплоэнерго» совместно с китайскими партнерами) [6].

Специалистами ИУУ СО РАН разработан инвестиционный проект с использованием технологий подземной газификации угля по созданию шести добывающих энергетических комплексов, общей электрической мощностью 850 МВт. Суть проекта: с помощью ПГУ добывается горючий газ на шести угольных месторождениях (или участках) и подаётся на шесть теплоэлектростанций, которые вырабатывают электроэнергию. По оценкам авторов проекта, необходимые инвестиции составляют 15,5 млрд. руб. срок окупаемости составит около трех лет [6].

В Чукотском АО будет реализован проект подземной газификации угля. Газификация угля позволит осваивать залежи, нерентабельные для традиционной разработки (глубина залегания не позволяет разрабатывать открытым способом), а также вырабатывать электроэнергию и производить жидкое топливо из полученного синтетического газа. В регионе обнаружены подходящие залежи угля. Речь идет об участках в районах расположения шахт «Нагорная» и «Угольная» [6].

В перспективе стоит задача создания единого комплекса по производству жидкого топлива из синтез-газа подземной газификации углей на поверхностных мобильных комплексах.

Накоплен многолетний зарубежный опыт подземной газификации заводов SASOL в ЮАР, фирмы «Shell», «General Electric», «Siemens», «Mitsubishi» [6].

Теоретический и практический опыт скважинной гидротехнологии добычи и подземной газификации углей позволяют подойти к новой стратегии разработки угольных месторождений с целью получения высокоэкономичного и высокоэффективного газообразного и жидкого топлива с помощью углехимических технологий с использованием мобильных или модульных установок, а также высокопроизводительных стационарных заводов на месте добычи полезных ископаемых.

Нами предлагается комплексное использование скважинной гидроструйной технологии (СГСТ) и подземной газификации угля (ПГУ). На сегодняшний день использование СГСТ в системах ПГУ заключается в проходке гидроразрывом газопроницаемого канала для сбоя скважин, от эффективности формирования которого во многом зависят качественные показатели производства генераторных газов — конечной товарной продукции комплекса СГСТ + ПГУ.

В частности, в отличие от основных альтернативных методов формирования газопроницаемого канала (огневая фильтрационная сбойка, гидроразрыв, бурение скважин) в технологии СГСТ + ПГУ многократно увеличивается первичная площадь соприкосновения термического агента с угольным пластом; возможна надёжная пространственная сбойка нагнетательной и газоотводящей скважин; ситуационный контроль огневого фронта и регулировка процесса горения пласта в целом; возможность крепления кровли угольного пласта и закладки выгоревшего пространства для предотвращения проседания земной поверхности [4].

Дополнительное преимущество данного направления — отсутствие огромных затрат при добыче угля (при открытых и подземных его разработках) и масштабных разрезов при разработках открытым способом, т. е. сохранение экологии в районах разработки угольных месторождений так как не образуются отвалы и терриконы из вскрышных и пород обогащения угля, занимающие значительные площади земель.

Кроме того, в ряде случаев возможно рациональное использование СГСТ в системах скважинной гидродобычи (СГД) угля — как без предварительной подготовки массива, так и с рыхлением угольного массива взрывом в зажатой среде. Основной акцент здесь делается на то, что товарной продукцией добычного комплекса является предварительно подготовленная угольная пульпа,

а это — полуфабрикат практически для всех направлений углехимии, и было бы нерационально складировать его на картах намыва, а затем осушать, перелопачивать, транспортировать потребителям и в дальнейшем утилизировать всеми имеющимися способами. Гораздо эффективнее создать единый комплекс, в частности, углехимической переработки выданной на-гора пульпы, с включением в него обогатительного и собственно химико-технологического комплекса. Тогда товарной продукцией подобного комплекса может быть синтетическое жидкое топливо (СЖТ) [2].

Таким образом, предлагаемые комплексные системы СГСТ+ПГУ позволяют вовлекать в эксплуатацию мелкие (по принятым масштабам) месторождения углей и самые разные по качеству (зольности и метаморфизму) и тем более находящиеся в сложных горно-геологических условиях залегания (большой коэффициент вскрыши, сложная морфология, сильная обводненность, высокая категория опасности по пыли и газу и др.), а также транспортной удаленности.

В свою очередь освоение подобных месторождений высокоэкологичным методом (отсутствует отчуждение земель под отвалы), не требующим производства высокзатратных вскрышных и горно-проходческих работ, в комплексе с использованием быстровозводимых малогабаритных модулей

обогащения и химической переработки, позволит обеспечить региональных потребителей местным топливом, в частности, СЖТ, затраты на производство которого ожидаются меньшее за счёт сокращения (как по временном, так и в денежном выражении) затрат на добычу и предварительную подготовку исходного сырья — угля.

Выводы

1. Необходимость производства жидкого синтетического топлива из угля осознано во всем мире, и в развитых странах практически создаются установки по гидрогенизации и газификации углей в промышленных масштабах.

2. Установки гидрогенизации и газификации угля на поверхности сами по себе дорогостоящее оборудование, и единственный конкурентоспособный путь для товарной продукции — это использование скважинной геотехнологии добычи угля и его подземной предварительной подготовки (взрывной или гидравлической) к последующему углехимическому переделу (СГТ+ПГУ):

1) с целью получения водоугольного топлива или искусственного композитного жидкого топлива;

2) с целью гидрогенизации с использованием процесса Бергюса и других каталитических и более совершенных процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонова Р.И., Бежанишвили А.Е., Блиндерман М.С., Грабская Е.П., Гусев А.Ф., Казак В.Н., Капралов В.К., Фоминых В.Г. Подземная газификация углей в СССР. Обзор / ЦНИЭИуголь. М., 1990. 98 с.
2. Аренс В.Ж., Брюховецкий О.С., Хчяян Г.Х. Скважинная гидродобыча угля. М.: Академия естественных наук (горно-металлургическая секция), 1995. 140 с.
3. Бежанова М.П., Стругова Л.И. Научно-информационный справочник «Ресурсы, запасы, добыча, потребление и цены важнейших полезных ископаемых мира», М.: ОАО «ВНИИЗАРУБЕЖГЕОЛОГИЯ», 2015. 160 с.
4. Брюховецкий О.С., Найденко И.Ю. Комплексная переработка углехимического сырья геотехнологическими методами // Мат. XII Международной научно-практической конференции «Новые идеи в науках о Земле», Т. 2, М., 2015. С. 98—99.
5. Мурко В.И. Физико-технические свойства водоугольного топлива. ГУ КузГТУ. Кемерово, 2009. 195 с.
6. Роговая М. Горение твердого топлива: перспективы угольной энергетики // Мат. Всеросс. конф. «Горение твердого топлива». 8—10 ноября 2014 Москва//«Инновации, технологии, решения». 2015. № 1. [Электронный ресурс] sibai.ru/index.php?id=845&Itemid=975&option=com_content&task=view. Дата обращения — 11 января 2016 г.
7. Шумейко М.В. Гидрогенизация угля // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2008. № 9. С. 32—39.