



ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ КАК РЕГУЛЯТОРЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В.В.Афанасьев, В.Г. Ковалев, В.А. Тарасов

Чувашский государственный университет им. И.Н.Ульянова,
г. Чебоксары, Россия
vladimir_tarasov@inbox.ru

Резюме: Целью статьи является исследование процессов электротермической газификации твердых топлив в энерготехнологических комплексах и оценка возможностей использования энерготехнологических комплексов для регулирования графиков нагрузок электроэнергетических систем. Методами математического и физического моделирования физико-химических процессов газификации твердых углеродосодержащих материалов и преобразования энергии получены основные характеристики энерготехнологических комплексов по переработке твердых углеродосодержащих материалов. Предложена технологическая схема маневренного потребителя электроэнергии и мощности, позволяющая участвовать в управлении спросом и повышении эффективности работы электроэнергетических систем, комплексно перерабатывать любые твердые виды топлив, строить системы коммунальной газификации районов, не имеющих доступ к источникам природного газа. Показано, что энергетический потенциал, полученного электротермической газификацией в электродных установках синтез-газа, в несколько раз превышает затраты электрической энергии на газификацию. В часы максимума нагрузки энергосистемы электротермический газификатор позволяет значительно уменьшать потребляемую активную мощность за счет перехода в автотермический режим газификации без снижения производительности по синтез-газу и работать на «рынке системных услуг» как регулируемая нагрузка. Электротехнологическая электродная установка позволяет использовать дешевую электрическую энергию ночных минимумов для выработки синтез-газа и получения углеводородными процессами ферросплавов из оксидов сырья и добавляемых рудных материалов. Электродная электротермическая установка обеспечивает широкий диапазон регулирования потребляемой электрической мощности, хорошую управляемость процесса при любом виде сырья, в том числе горючих твердых отходов. Высокотемпературные восстановительные процессы в электродных печах позволяют перерабатывать твердые топлива любого состава без предварительного размола и обогащения, переводить минеральную часть топлива в шлак, который может использоваться для получения строительных материалов. Содержащиеся в минеральной части топлива оксиды ряда металлов восстанавливаются и образуют ферросплав.

Ключевые слова: Энерготехнологические комплексы, электротермическая газификация, восстановительные процессы высококачественный синтез-газ, комплексное использование сырья, потребитель-регулятор, оптимизация систем энергообеспечения.

Для цитирования: Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Тарасов В.А. Энерготехнологические комплексы как регуляторы работы электроэнергетических систем // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т.21. №5. С.50-58. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-5-50-58.

ENERGY TECHNOLOGY COMPLEXES AS REGULATORS OF ELECTRICAL POWER SYSTEMS

VV Afanasyev, VG Kovalev, VA Tarasov

Chuvash State University, Cheboksary, Russia

vladimir_tarasov@inbox.ru

Abstract: The aim of the work is to study the processes of electrothermal gasification of solid fuels in energy technological complexes and to assess the possibilities of using energy technological complexes for regulating load schedules of electric power systems. By the methods of mathematical and physical modeling of physicochemical processes of gasification of solid carbon-containing materials and energy conversion, the main characteristics of electro-technological complexes for the processing of solid carbon-containing materials are obtained. A technological scheme of a maneuverable consumer of electricity and power is proposed, allowing to participate in demand management and increase the efficiency of electric power systems, comprehensively process any solid types of fuels, and build municipal gasification systems for areas that do not have access to natural gas sources. It is shown that the energy potential of the synthesis gas obtained by thermoelectric gasification in electrode installations is several times higher than the cost of electricity for gasification. During the hours of maximum load of the power system, the electrothermal gasifier allows to significantly reduce the consumed active power due to the transition to the autothermal gasification mode without reducing the performance of synthesis gas and work in the "market of system services" as a regulated load. Electrotechnological electrode installation allows the use of cheap electric energy of nighttime minima for the production of synthesis gas and the recovery of ferroalloys from oxides of raw materials and ore materials to be added to the coal recovery process. Electrode electrothermal installation provides a wide range of regulation of consumed electrical power, good process controllability for any type of raw materials, including combustible solid waste. High-temperature reduction processes in electrothermal gasifiers make it possible to process fuel of any composition without enrichment and grinding, to convert the mineral part of solid fuel into slag, which can be used to produce building materials. The oxides of a number of metals contained in the mineral part of the fuel are reduced and form a ferroalloy.

Keywords: Energy technology complexes, electrothermal gasification, recovery processes, high-quality synthesis gas, complex use of raw materials, consumer-regulator, optimization of energy supply systems.

For citation: Afanasyev VV, Kovalev VG, Tarasov VA. Energy technology complexes as regulators of electrical power systems. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(5):50-58. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-5-50-58.

Введение

Основой повышения эффективности и надежности энергетического комплекса служат новые технологии и возможности цифрового управления режимом работы элементов электроэнергетических систем, включая потребителей энергии. Несмотря на определенный консерватизм энергетики в части используемых технологий и оборудования ведутся разработки и внедряются современные технологии топливной выработки электрической энергии [1-5], в основе которых тепловые машины с использованием газообразного или жидкого топлива. Важным направлением развития технологий топливной энергетики является вовлечение в современные энергетические переделы твердых видов топлив, в том числе низкосортных местных и углеродосодержащих отходов, что возможно на основе создания энерготехнологических комплексов [6-8]. О важности увеличения доли угля в топливно-энергетическом балансе страны отмечается также в Энергетической стратегии России (2030г), однако мониторинг основных результатов реализации Энергетической стратегии за последние годы показывает, что доля угля не растет, а неуклонно снижается.

Задачи, которые могут и должны решать энерготехнологические комплексы, связаны с повышением надежности и эффективности функционирования систем энергообеспечения, а также со снижением техногенного воздействия на окружающую среду, с использованием местных низкосортных топлив, в том числе твердых углеродосодержащих отходов

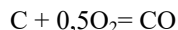
производства и потребления [8-10]. Данная работа посвящена исследованию технологических процессов электротермической газификации [11,12] и оценки возможностей использования энерготехнологических комплексов для повышения эффективности генерации с использованием твердых видов топлив и возможностями участия в регулировании графиков нагрузок электроэнергетических систем

Цифровые технологии открывают новые возможности оптимизации систем энергообеспечения и их режимов работы. Их применение совместно с использованием распределенной генерации и управлением режимами потребления и генерации должно обеспечить повышение эффективности локальных и больших систем электроэнергетики. Для эффективного использования цифровых технологий необходимы маневренные технологии генерации, потребления и накопления энергии.

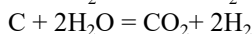
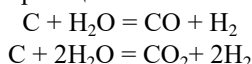
Неравномерность суточных нагрузок энергосистем оказывает существенное влияние на их экономические показатели. Оптимизация графиков электрических нагрузок (потребляемой мощности) потребителей дает возможность существенно скорректировать суммарный график электрической нагрузки в сторону снижения потребности в генерирующих и сетевых мощностях, текущих издержках на производство и передачу электроэнергии. Финансово-экономический механизм ценозависимой генерации заложен в принципы функционирования оптового рынка энергии и мощности, а финансово-экономический механизм ценозависимого потребления включен в состав инструментов регулирования спроса и предложения в ЕЭС России в 2016 г. (Постановление Правительства РФ от 20.07.2016 г. № 699). Это позволяет достичь выгоды за счет системного снижения издержек и цены на рынке в пиковые часы нагрузки энергосистемы. В отечественной практике регулирование нагрузки электроэнергетической системы осуществляется изменением режимов потребления крупных приемников электрической энергии путем снижения мощности в часы максимума нагрузки. Данный способ может применяться на таких крупных потребителях электроэнергии как производство ферросплавов, продуктов химической электротермии, алюминия [13]. Вторым способом регулирования нагрузки является заполнение графика в «провалах» ночного потребления электрической энергии. В этом случае требуются маневренные технологии, позволяющие периодически увеличивать потребление электроэнергии в часы минимума нагрузки энергосистемы. В мировой практике объемы регулирования мощности управлением спросом на электроэнергию в ближайшие годы ожидает резкий рост (*Navigant Research, Market Data: Demandresponse*, 2016. Электронный ресурс <https://www.navigantresearch.com/news-and-views/global-demand-response-capacity-is-expected-to-grow-to-144-gw-in-2025>).

Оба этих способа управления спросом на электроэнергию обеспечивают выравнивание суточных графиков нагрузки энергосистемы и могут применяться с использованием электротехнологических комплексов газификации твердых видов топлив, позволяющие переработать углеродосодержащие материалы в удобный для использования в энергетике и химической промышленности синтез-газ. Энерготехнологические комплексы газификации могут создаваться с использованием различных технологий пиролиза и газификации топлив в автотермических или аллотермических режимах.

В настоящее время разработаны научные основы процессов газификации различных видов топлив, описаны физико-химические превращения топлив, созданы математические модели процессов пиролиза и газификации твердых топлив [8,11,12,14,15]. При высокотемпературной газификации твердого топлива химические реакции протекают при взаимодействии углерода с газообразным кислородом или водяным паром. Выделением тепла сопровождается реакция



С поглощением тепла протекают реакции

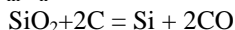
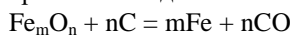


Для протекания эндотермических реакций необходим подвод тепловой энергии, который может осуществляться за счет сжигания части твердого топлива (автотермический процесс) или за счет подвода внешней энергии (аллотермический процесс) [11,12]. Автотермические технологии газификации в плотном слое сырья и псевдоожиженном (кипящем) слое, а также в барботируемом шлаковом расплаве в настоящее время хорошо изучены и внедрены в практику [1-3,14,15]. Разработано множество автотермических газогенераторов, работающих в широком диапазоне режимных параметров. Аллотермическая газификация с применением электронагрева возможна в электродных электропечах [11,12],

аналогичных по конструкции и принципу действия герметичным рудовосстановительным печам, а также в плазменных установках [16].

Недостатком автотермических технологий является существенный расход топлива на поддержание температуры процесса и необходимость использования газообразного кислорода и водяного пара для получения высококалорийного синтез-газа. При использовании топлива с высоким содержанием минеральных составляющих (каменный уголь и сланец) и низкой теплотворной способностью используемого топлива, температуры шлакового расплава недостаточно для обеспечения высокопроизводительного процесса газификации, а получение газа, энергетическая ценность которого превышала бы 70% энергетической ценности используемого топлива, практически невозможно. Вследствие недостаточной жидкотекучести шлака возникают проблемы выведения расплавленной минеральной части топлива из рабочего пространства газификаторов.

При аллотермической газификации в ваннах электродных печей происходит преобразование электрической энергии в тепловую, что позволяет осуществлять любые эндотермические процессы и использовать любые газифицирующие агенты. Необходимый для газификации углерода кислород может быть газообразным, а также входить в состав водяных паров или оксидов железа, кремния и других элементов. При использовании газообразного кислорода тепло выделяется, продуктом газификации является только оксид углерода, при использовании водяного пара тепло поглощается, продуктами газификации являются оксид углерода и водород. При достаточно высокой температуре углерод может восстанавливать имеющиеся в составе золы или подаваемые в электродную печь в виде рудных материалов оксиды железа и кремния с выделением оксида углерода



При восстановлении оксидов тепло поглощается, образуется оксид углерода и дорогостоящий продукт (чугун или ферросплав).

Таким образом, в электротермических электродных газификаторах в качестве газифицирующего агента кроме воздуха могут применяться кислород, водяной пар и оксиды железа и кремния. Это позволяет получать незабалластированный азотом синтез-газ, состоящий в основном из оксида углерода и водорода. Водяной пар может быть получен за счет утилизации тепла выходящего из рабочего пространства электротермической установки горячего реакционного газа.

Методы исследования и результаты

Математическим и физическим моделированием исследованы электротехнологические режимы комплексов для безотходной электротермической переработки твердых углеродосодержащих материалов путем пиролиза и газификации [11,12]. Электротехнологический комплекс кроме газификатора включает различные системы, использующие синтез-газ, это могут быть энергетические котлы, ТЭЦ, газотурбинные, газопоршневые или парогазовые установки, локальные системы газоснабжения, газгольдеры, а также установки для получения кислорода. В электродной установке термоэлектрической (электрошлаковой) газификации за счет преобразования электрической энергии в тепловую можно создать высокую температуру для образования синтез-газа и протекания процессов восстановления углеродом оксидов, содержащихся в минеральной части топлива или подаваемых дополнительно с рудным материалом, с образованием металлического сплава [11,12]. Подобные углеводородные процессы восстановления оксидов марганца, кремния, хрома и других окислов в коксом с образованием оксида углерода протекают в промышленных рудовосстановительных печах. При этом тепловую энергию для протекания эндотермических реакций получают преобразованием электрической энергии в тепловую за счет резистивного нагрева. Герметичность промышленных электродных печей позволяет полностью отбирать из ванн реакционный газ, состоящий преимущественно из оксида углерода, для использования в различных технологиях.

Протекающие в реакционной зоне электротермического газификатора пиролизно-восстановительные процессы позволяют перерабатывать углеродосодержащее топливо любого состава без предварительного обогащения и размола, снизить выброс оксидов серы в атмосферу за счет связывания серы оксидом кальция и перехода в шлаковый расплав в виде сульфидов, перевести минеральную часть топлива в шлак, который может использоваться как сырьё для получения инертных или связующих строительных материалов. Содержащиеся в минеральной части топлива оксиды ряда металлов восстанавливаются и образуют ферросплав, который используется в металлургии.

Электротермическая газификация в электродной установке позволяет сохранить все положительные особенности автотермической газификации в шлаковом расплаве [2, 3]. Она обладает дополнительными преимуществами из-за повышения устойчивости и управляемости процесса при использовании любого сырья, существенного расширения диапазона регулирования производительности, легкости пуска и остановки установки и работы в качестве потребителя-регулятора энергосистемы за счет использования дешевой электроэнергии ночных минимумов. Рассматриваемая технология позволяет использовать электрошлаковую газификацию для выравнивания электрической нагрузки сети, загружая электрошлаковые газификаторы в ночное время и запасаая синтез-газ в газгольдерах. Данная технология позволяет одновременно осуществлять энергетическую и металлургическую технологии с получением: синтез-газа, шлака и металлического сплава, существенно снизить суммарные затраты энергии по сравнению с отдельными технологиями металлургического восстановления оксидов и газификации твердого топлива.

Для электротермической газификации, в энерготехнологический комплекс подается твердое топливо и газифицирующие агенты, которыми могут быть кислород, а также оксиды железа, кремния или марганца в виде руды. За счет восстановления углеродом этих оксидов образуется горючий оксид углерода, а также чугун или ферросплавы. Такие энергоемкие процессы протекают в промышленных рудовосстановительных печах, единичная мощность которых достигает 80 МВА. В этих печах фактически происходит газификация входящего в состав кокса углерода за счет оксидов без применения кислорода. При дефиците мощности в энергосистеме потребление электрической энергии газификатором может быть резко уменьшено и процесс газификации ведется подачей в газификатор углеродосодержащего топлива и большого количества кислорода. При избытке мощности в энергосистеме сокращается подача кислорода в газификатор и увеличивается подача оксидов восстанавливаемых элементов и водяного пара. В этом случае для газификации углеродосодержащего материала наряду с газообразным кислородом используется кислород, входящий в состав оксидов и водяного пара. За счет увеличенного потребления электроэнергии протекают эндотермические реакции восстановления оксидов, что наряду с получением генераторного газа обеспечивает получение дорогостоящих металлических сплавов железа, кремния, марганца и других элементов. Для повышения эффективности использования электроэнергии в ночные часы за счет дополнительной выработки металлических сплавов и работы на «рынке системных услуг» как регулируемая нагрузка электротермический газификатор должен позволять значительно менять потребляемую активную мощность без существенного снижения производительности по генераторному газу.

Математическим моделированием материальных и энергетических балансов процессов электротермической газификации [11,12] и экспериментальными исследованиями на лабораторной одноэлектродной электропечи определены основные характеристики режимов энерготехнологических комплексов для газификации твердых углеродосодержащих материалов. Рассчитаны потребляемая электротермическим газификатором активная электрическая мощность и расходы газифицирующих агентов при различных электротехнологических режимах, обеспечивающих заданный энергетический потенциал продуктов газификации.

Расчеты материальных и энергетических балансов показали, что газификация в электротехнологической установке обеспечивает широкий диапазон регулирования потребляемой мощности, а экспериментальные лабораторные исследования подтвердили хорошую управляемость процесса при любом виде сырья, в том числе горючих твердых отходов.

Из приведенных в таблице показателей режимов электротермической газификации каменного угля с содержанием углерода $C^p = 76\%$ при использовании для газификации газообразного кислорода при дефиците электроэнергии в энергосистеме (режим «день»), а также кислорода и оксидов кремния или кислорода и оксидов железа при избытке электроэнергии в системе (режим «ночь») следует, что при электротермической газификации твердого топлива газообразным кислородом электрическая мощность, потребляемая электротехнологическим газификатором в режиме «день», в 138 раз меньше, чем при использовании для газификации кислорода оксидов в виде руды при одинаковом выходе и энергетическом потенциале генераторного газа. Незначительное количество металлического сплава при этом получается при восстановлении оксидов, входящих в состав минеральной части газифицируемого топлива. Количество получаемого металлического сплава при использовании оксидов в виде руды в десятки раз больше, чем при газификации газообразным кислородом. Использование оксидов кремния позволяет

получить дорогостоящий ферросилиций, который производится только в рудовосстановительных электропечах с применением кокса. С учетом расхода электроэнергии на получение кислорода потребление электроэнергии электротехнологическим комплексом в режиме «день» в 4,9 раза меньше, чем в режиме «ночь». Из таблицы следует, что при даже при коэффициенте полезного действия генерирующей установки 42% в потребляемая газификатором электрическая мощность всегда меньше мощности, которую может выработать генерирующая установка на синтез-газе, полученном в газификаторе.

Таблица

Основные показатели режимов электротехнологических комплексов
газификации каменного угля

Электротехнологический режим	Дефицит электроэнергии в системе	Избыток электроэнергии в системе (ночь)	
Газифицирующие агенты	Кислород	Кислород и оксиды кремния	Кислород и оксиды железа
Потребляемая активная мощность газификатора, МВт	0,180	24,86	24,86
Расход			
Кислород, нм ³ /час	14153	12032	10575
Уголь, т/час	20,04	20,04	20,04
Оксиды (руда), т/час	-	5,256	15,28
Шлакообразующие, кг/час	-	-	2530
Железная стружка, кг/час	-	584	-
Выход			
Металлический сплав, кг/час	400	2920	10000
Горючий газ, нм ³ /час	30000	30000	30000
Энергетический потенциал газа, ГДж/час	360	360	360
Электрическая мощность генерирующей установки, МВт	42	42	42
Тепловая мощность генерирующей установки, МВт	45	45	45
Электрическая мощность комплекса с учетом затрат на получение кислорода, МВт	35,73	11,97	11,05

При дефиците электроэнергии в системе в режиме «день» в качестве газифицирующего агента используется только кислород без применения оксидов, потребляемая газификатором электрическая мощность минимальна, количество металлического сплава незначительно. Энерготехнологический комплекс, в состав которого входят работающие на синтез-газогенерирующие установки (газотурбинные, парогазовые), не потребляет электрическую мощность из сети, а генерирует электроэнергию в сеть и в тоже время обеспечивает выработку тепловой энергии. Таким образом, энерготехнологический комплекс, в состав которого входят генерирующие электроэнергию установки, в любом режиме работы не потребляет электрическую мощность из сети и в тоже время обеспечивает выработку тепловой энергии. С учетом затрат электроэнергии на получение кислорода при удельном расходе электроэнергии на получение газообразного кислорода 0,43 кВт·ч/м³ электротехнологический комплекс может выдавать с сеть в режиме «день» мощность до 35,7 МВт, в режиме «ночь» до 11 МВт. В современных воздуходелительных установках удельный расход электроэнергии на получение газообразного кислорода может быть снижен до 0,33 кВт·ч/м³ [17]. При таком низком удельном расходе электроэнергии на получение газообразного кислорода и коэффициенте полезного действия парогазовой установки 58% рассмотренный электротехнологический комплекс может выдавать с сеть в режиме «день» мощность до 53,3 МВт.

За счет применения кислорода можно менять в широком диапазоне потребляемую из сети мощность без снижения производительности по газу вплоть до отключения газификатора от электросети. При достаточной для углевосстановительных процессов

электрической мощности и достаточной подаче оксидов кислород вообще не требуется, наряду с получением горючего газа будет осуществляться производство ферросплавов, как в рудовосстановительных печах.

Для сравнения следует отметить, что в плазменных газификаторах при температурах порядка 2000°-4000°С, также происходит полная газификация любых твердых топлив, однако удельный расход электроэнергии при этом составляет до 18 МДж/кг топлива [16], что в 2-4 раза больше, чем при электротермической газификации в электродных печах. Такой расход электроэнергии обусловлен необходимостью нагрева всех компонентов до избыточно высоких температур, хотя для полной газификации углерода достаточно иметь температуры порядка 1200°С [11,12]. Серьезной проблемой применения плазменных технологий для непрерывных процессов является низкая продолжительность работы плазмотронов [18]. Плазменные газификаторы могут работать только на постоянной потребляемой из сети мощности и не могут быть использованы как потребители-регуляторы нагрузок энергосистемы.

Заключение

Электротермические электродные газификаторы позволяют использовать дешевую электрическую энергию ночных минимумов для повышенной выработки высококачественного синтез-газа и получения ферросплавов и резко снижать потребление электроэнергии в часы максимума за счет перехода в автотермический режим газификации без снижения производительности по горючему газу. Потому энерготехнологические комплексы кроме получения полезных продуктов могут работать в качестве потребителя-регулятора мощности энергосистемы.

Исследованы возможности технологии газификации твердых видов топлив для создания маневренного потребителя электроэнергии (мощности) позволяющей:

- участвовать в управлении спросом на уровне мегаваттных мощностей и повышении эффективности работы электроэнергетических систем;
- комплексно перерабатывать твердые виды топлив, в том числе местные низкосортные и твердые углеродосодержащие отходы производства и потребления;
- строить системы коммунальной газификации районов, не имеющих доступ к источникам природного газа, повышая эффективность коммунальной энергетики.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Кабинета Министров Чувашской республики в рамках научного проекта №18-48-210006.

Литература

1. Олховский Г.Г. Газификация твердых топлив в мировой энергетике (обзор) // Теплоэнергетика. 2015. №7. С. 3-13.
2. Баласанов А.В. Перспективы использования высокотемпературной газификации твердого топлива в шлаковом расплаве // Уголь. 2013. № 9. С. 61-64.
3. Ермагамбет Б. Т. Газификация казахстанских сланцев и высокосольных углей в барботируемом шлаковом расплаве // Наука, техника, образование. 2016. №9(27). С. 26-29.
4. Сучков С.И. Эффективный способ модернизации устаревших угольных ТЭЦ // Теплоэнергетика. 2016. №12. С. 23-34.
5. Jianyun Z. Efficiency of wet feed IGCC system with coal-water slurry preheating vaporization technology // Energy. 2013. pp. 1-9.
6. Батенин В.М. Энерготехнологические комплексы – реальный путь резкого повышения эффективности использования органических видов топлив // Электроэнергетика России: проблемы и перспективы труды научной. Сессии РАН. 2006. С.112-116.
7. Паршуков В.И. Энерготехнологический комплекс на основе технологий переработки отходов // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2018. № 95. С. 66-77.
8. Пятагина М.В. Комплексное использование торфа на основании молекулярного состава его органической массы // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 5-6. С. 3-13.
9. Fereidoun R. Structure of peat soils and implications for water storage, flow and solute transport: A review update for geochemists // Chemical Geology. 2016. V. 429. pp. 75-84.
10. Вишняков Я. Д. Стратегический курс российской федерации на промышленную переработку отходов и вторичных ресурсов, экотехнопарки - основа отрасли. // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2017. №4. С. 151-157.
11. Афанасьев В.В, Ковалев В.Г, Тарасов В.А, и др. Электротермическая газификация твердых топлив // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-2. Доступно по: <http://www.science->

education.ru/ru/article/view?id=19836. Ссылка активна на: 15.07.2019.

12. Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Тарасов В.А. и др. Исследование физико-химических свойств газификации местных видов топлив // *Фундаментальные исследования*. 2016. №9. Ч. 2. С. 227-232.

13. Чердниченко В.С. Ресурсосбережение при эксплуатации рудовосстановительных электропечей в режимах ограничения энергообеспечения // *Электрометаллургия*. 2004. № 7. С. 28-36.

14. Mingaleeva G.R. Physico-chemical foundations of produced syngas during gasification process of various hydrocarbon fuels // *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2016. V. 18. pp. 297-304.

15. Pechenegov Yury Y. Oxidative pyrolysis of oil shale in tubular flow reactors with external heating // *Solid fuel chemistry*. 2017. V. 51. № 1. pp. 40-43.

16. Karpenko E.I. Plasma Aided Combustion and Fuels Utilization // *Proceedings of the tenth International Conference on Combustion and Energy Utilisation (10th ICCEU)*. Mugla University, Mugla, Turkey. 2010. pp. 2-9.

17. Карп И. Н. Использование кислорода и обогащенного кислородом воздуха в нагревательных печах, колодцах, стендах разогрева сталеразливочных ковшей // *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2012. №3. С. 18-29.

18. Чердниченко М. В. Эрозия электродов плазмотронов при использовании различных источников питания // *Электрометаллургия*. 2017. №6. С. 2-7.

Авторы публикации:

Афанасьев Владимир Васильевич – д-р. техн. наук, зав. кафедрой теплоэнергетических установок Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова. E-mail: avvteo@mail.ru.

Ковалев Владимир Геннадьевич – канд. техн. наук, декан факультета энергетики и электротехники, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова. E-mail: esp21@mail.ru.

Тарасов Владимир Александрович – канд. техн. наук, доц. кафедры теплоэнергетических установок, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова. г. Чебоксары. E-mail: vladimir_tarasov@inbox.ru.

References

1. Ol'khovskii GG. Gasification of solid fuel in the global energy sector. *Heat power engineering*. 2015;7:3-13.

2. Balasanov AV, Usachev AB, Komkov AA, Fedorov AN. Prospects for the use of high-temperature gasification of solid fuels in the slag melt. *Dityatovskii. Ugol'*. 2013;9:61-64.

3. Ermagambet BT, Nurgaliev NU, Shalabaev Zha, Kholod AV, Zikirina A.M Gasification of Kazakhstan shale and high-ash coal in a sparged slag melt. *Science, technology, education*. 2016; 9(27): 26-29.

4. Suchkov SI, Suchkov VR, Kotler VA, et al. An effective way to upgrade obsolete coal-fired power plants. *Heat power engineering*. 2016;12:23-34.

5. Jianyun Z. Efficiency of wet feed IGCC system with coal-water slurry preheating vaporization technology. *Energy*. 2013. pp. 1-9.

6. Batenin VM, Maslennikov VM, Tolchinskii LS. Energy technology complexes-a real way to improve the efficiency of the use of organic fuels in energy technology complexes-a real way to dramatically increase the efficiency of the use of organic fuels in the Russian power industry: problems and prospects. *tr. science. session of RAS*. 2006. pp.112-116.

7. Parshukov VI, Efimov NN, Ikonnikov VK, et al. Energy technology complex based on waste processing Technology and technical means of mechanized production of agricultural crops. 2018;95: 66-77.

8. Pyatygina MV, Mingaleeva GR. Complex use of peat on the basis of the molecular composition of its organic mass. *Proceedings of higher educational institutions. Energy problem*. 2017;19(5-6):3-13.

9. Fereidoun R. Structure of peat soils and implications for water storage, flow and solute transport: A review update for geochemists. *Chemical Geology*. 2016;429:75-84.

10. Vishnyakov YaD, Kiseleva SP, Mar'ev VA, et al. The strategic course of the Russian Federation on the industrial processing of waste and secondary resources, ecotechnique of osnovateli. *Problems of mechanical engineering automation*. 2017;4:151-157.

11. Afanas'ev VV, Kovalev VG., Orlov VN, et al. Electrothermal gasification of solid fuels. Modern problems of science and education. 2015. Available at URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=19836>. Accessed to: 15.07.2019.

12. Afanas'ev VV, Kovalev VG, Orlov VN, et al. Study of the physicochemical properties of

gasification of local types of fuels. *Fundamental study*. 2016;9 (Pt2):227-232.

13. Cherednichenko VS, Popov AN, Khatsevskii VF. Resource conservation in the operation of ore recovery electric furnaces in modes of limiting energy supply. *Electrometallurgy*. 2004;7:28-36.

14. Mingaleeva GR. Physico-chemical foundations of produced syngas during gasification process of various hydrocarbon fuels. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2016;18: 297-304.

15. Pechenegov Yury Y. Oxidative pyrolysis of oil shale in tubular flow reactors with external heating. *Solid fuel chemistry*. 2017;51(1):40-43.

16. Karpenko EI. Plasma Aided Combustion and Fuels Utilization. *Proceedings of the tenth International Conference on Combustion and Energy Utilisation (10th ICCEU)*. Mugla University, Mugla, Turkey. 2010. pp. 2-9.

17. Karp IN, Zaivyi AN, Martsevoi EP, et al. The use of oxygen and oxygen-enriched air in heating furnaces, wells, stands for heating of casting ladles. *Energy technology resource saving*. 2012;3:18-29.

18. Cherednichenko MV, Serikov VA, Butakov EB, et al. Erosion of plasma torch electrodes using different power sources. *Electrometallurgy*. 2017;6:2-7.

Authors of the publication

Vladimir V. Afanasyev – Chuvash State University, Cheboksary, Russia. E- mail: avvteo@mail.ru.

Vladimir G. Kovalev – Chuvash State University, Cheboksary, Russia. E- mail: espp21@mail.ru.

Vladimir A. Tarasov – Chuvash State University, Cheboksary, Russia. E-mail: vladimir_tarasov@inbox.ru.

Поступила в редакцию

18 августа 2019 г.