DOI: 10.34831/EP.2020.26.72.005

Электро-ионизационная технология растопки пылеугольных котлов без применения высокореакционного топлива

КУЧАНОВ С. Н., ООО «КОТЭС Инжиниринг»
СИНЕЛЬНИКОВ Д. С., ООО «КОТЭС Инжиниринг», Новосибирский государственный технический университет
КОЧЕРГИН Д. О., ООО «КОТЭС Инжиниринг»
630049, г. Новосибирск, Красный просп., 182/1
info@cotes-e.com

С. Н. Кучанов

Д. С. Синельников

Д. О. Кочергин

Мазут традиционно используется в качестве растопочного топлива для пылеугольных котлов. В настоящее время его стоимость при пересчёте на условное топливо превышает стоимость угля в 3 раза. Кроме того, с переходом на более глубокую переработку нефти качество мазута, поступающего на станции, ухудшается, а стоимость его увеличивается. Мазутное хозяйство электростанций — объект повышенной пожароопасности, оно требует постоянного обслуживания и имеет относительно большую материалоёмкость. Таким образом существуют экономические и технологические предпосылки к отказу от использования мазута. В группе компаний КОТЭС предложен новый электро-ионизационный способ безмазутный растопки промышленных котлов, являющийся альтернативой известной технологии с использованием дуговых плазматронов. Разработаны технические решения, позволяющие увеличить эксплуатационную надёжность, безопасность и тепловую мощность растопочных горелок на угле. Сформированы комплексные предложения с техническими решениями к проекту безмазутных угольных ТЭС.

Ключевые слова: безмазутный розжиг, воспламенение пылеугольного факела, стабилизация пылеугольного факела, мазут, плазматрон, угольная генерация, растопка пылеугольных котлов, растопочная горелка, электро-ионизационная технология.

В энергетике для растопки, стабилизации процесса горения факела, а также в качестве резервного топлива для пылеугольных котлов используется высокореакционное топливо: мазут или природный газ. Применение природного газа ограничено рядом различных факторов, в том числе экономических. Использование на станциях мазута в качестве растопочного топлива имеет следующие недостатки:

1) экономические — стоимость содержания мазутного хозяйства на электростанциях увеличивается с каждым годом, это существенная статья расходов для угольных генераций. На сегодняшний день на Российских станциях закупочная стоимость мазута в пересчёте на тонну условного топлива в 3 раза превышает стоимость угля;

2) технологические — по мере углубления переработки нефти доля прямогонного мазута в котельных топливах снижается, а доля гудрона и тяжёлых остатков крекинг-процессов растёт, т. е. качество топочного мазута, поступающего на станцию, ухудшается [1];

3) экологические — из-за высокого содержания серы в мазуте при использовании его на котлах выброс серы увеличивается на 30 – 40 %. Экологические нормы по выбросам, ужесточаются с вводом новых стандартов, и использование мазута становится проблемой для теплоэлектростанций;

4) эксплуатационные — мазутное хозяйство характеризуется высокой металлоёмкостью. Мазут — вязкое топливо, для циркуляции которого требуется его нагрев до температуры 70 – 100 °С. Мазут пожароопасен (в качестве примера можно привести аварию на мазутном хозяйстве блока, станционный № 3, Березовской ГРЭС) и токсичен, попадание несгоревшего мазута в систему гидрозолоудаления приводит к серьёзным экологическим последствиям.

Работы, посвящённые отказу или сокращению использования мазута на пылеугольных котлах, ведутся с середины 60-х годов прошлого века. Один из примеров — разработка муфельных горелочных устройств. В муфельных горелках на первоначальном этапе осуществляется сгорание угольной пыли для прогрева обмуровки муфеля и газификации твёрдого топлива. Предварительная термохимическая обработка угольной пыли в газификационном муфелизированном предтопке позволяет получить на выходе из него легко воспламеняющуюся газо-воздушную смесь. Опыт эксплуатации муфельных горелок накоплен на ТЭЦ-11 ОАО «Иркутскэнерго» [2].

Полный отказ от использования мазутного хозяйства на угольных ТЭС представляется одним из путей совершенствования технологии производства тепловой и электрической энергии. Вопреки устоявшемуся мнению, что угольные электростанции выделяют большое количество вредных выбросов, они могут быть достаточно экологичными источниками энергии, в том числе благодаря технологии безмазутного розжига.

Серьёзный подход к исследованию безмазутных технологий розжига топлива имел место в СССР. Тогда же была предложена плазменная технология воспламенения пылеугольного топлива. Данная технология позволяет вести растопку котла из холодного состояния без использования высокореакционного топлива. Принципиальное отличие и преимущество плазмохимических процессов от традиционных химических заключено в трёх моментах идеологии плазмы [3]:

– высокие энергии теплового источника;

– концентрация высокой энергии в малом объёме;

– наличие большого количества возбуждённых частиц, стимулирующих горение.

Технология с электродуговым плазматроном была опробована на десятках различных котлов страны при сжигании широкой гаммы углей [4] и подтвердила свою эффективность, однако по ряду причин технического и технологического характера не получила широкого распространения. Тем не менее, компания Yantai Longyuan Electric Power Technology Co. Ltd (Китай), модернизировав в 90-х годах XX века плазменно-топливные системы первого поколения (разработки СССР), использовала их на 400 котлах Китая установленной мощностью более 160 млн кВт [5]. В последующие годы технология развивалась за счёт внедрения новых электродуговых плазмотронов второго и третьего поколений, при этом ряд электростанций перешёл полностью на безмазутный режим растопки, отказавшись от использования и содержания мазутного хозяйства.

Технология электродугового плазматрона постоянного тока имеет свои недостатки и возможности улучшения. С учётом опыта Китая можно отметить несколько особенностей промышленного использования безмазутного плазменного розжига. Система с плазматроном ориентирована по большей части только на розжиг котла, и при малой частоте пусков котла экономический эффект от применения плазматронов снижается. Также стоит отметить, что данная система может использоваться лишь короткое время для целей подхвата факела и стабилизации горения, поскольку ресурс электродного блока составляет всего несколько сотен часов. Большое негативное влияние в эксплуатации оказывает высокое энергопотребление источников питания плазматронов. Мощность таких источников питания варьируется от 150 до 500 кВт на одно горелочное устройство.

Сравнительные характеристики плазменных безмазутных технологий растопки

Технология	Электродуговой плазматрон	Электроионизационный воспламенитель
Тип источника питания	Постоянный ток	Переменный ток высокой частоты
Мощность источника питания, кВт	150 – 500	3 – 10
Система охлаждения	Водяное охлаждение плазматрона	Естественное охлаждение в потоке пылевоздушной смеси
Ресурс работы электродного блока, ч.	Менее 200	Более 2000
Вид электрического разряда	Электродуговой	Диффузионный (тлеющий разряд переходного типа)
Процессы ионизации	Не задействованы	Активно используются
Процессы термоактивации молекул.	Активно используются	Минимальное воздействие

В группе компаний КОТЭС более 10 лет назад, отталкиваясь от современных запросов энергетического рынка, начали разработку новой плазменной технологии безмазутного розжига. Была предложена электроионизационная технология, не требующая мощного источника питания и ориентированная, в том числе, на стабилизацию горения пылеугольного топлива. В 2009 г. получен российский патент на устройство [6]. В последующие годы специалистами КОТЭС защищено ещё пять патентов, относящихся к технологии «устройство воспламенительное электроионизационное (УВЭИ)». Состоятельность и эффективность система УВЭИ подтверждена практическим внедрением опытных экземпляров на российских ТЭС и котельных.

Таким образом, на сегодняшний день на рынке России есть две конкурирующие плазменные технологии безмазутной растопки угольных котлов без использования высокореакционного топлива. Основные технические характеристики технологии представлены в верхней части данной страницы.

Рассматривая приведённые характеристики, можно отметить несколько аспектов, практически важных при эксплуатации на реальных объектах. Электрическая мощность, потребляемая источниками питания, имеет существенное значение как со стороны экономических затрат на собственные нужды станции при растопке котла, так и со стороны дополнительных эксплуатационных проблем при подключении. Эксплуатация электродуговых плазмотронов требует подвода к горелочному устройству значительной электрической мощности, а также коммуникаций системы водяного охлаждения. Но даже несмотря на интенсивное охлаждение ресурс работы электродного блока электродугового плазмотрона существенно ограничен. В свою очередь, система УВЭИ не требуется водяного охлаждения и значительных электрических мощностей, что позволяет обеспечить более простое её обслуживание в процессе длительной промышленной эксплуатации горелок. Что касается длительности межремонтного интервала, то срок эксплуатации электродного блока УВЭИ минимум в 10 раз превышает аналогичный показатель электродного бока электродугового плазматрона.

При разработке технологии сжигания с плазматроном преобладал традиционный подход, основанный на термохимическом механизме активации горе-

Рис. 1. ***Вольт-амперная характеристика, описывающая тип разряда***

Рис. 2. ***Активирующее влияние излучения разрядов***

ния топлива. Выбранный традиционный подход не обеспечивает в нужном объёме использование всех процессов, имеющих место при воспламенении пылеугольного топлива в присутствии плазмы.

На рис. 1 показана вольт-амперная характеристика разных типов электрического разряда. Электрический разряд в системе УВЭИ находится в области так называемых диффузионных разрядов тлеющего типа с частичным переходом в дуговую форму, но без просадки напряжения. Параметры разряда в системе УВЭИ соответсвуют высоким напряжениям (порядка 10 кВ) и низкой силе тока (порядка 1 А). У электродугового плазматрона параметры разряда имеют противоположные характеристики. Ток разряда очень высокий (порядка нескольких тысяч ампер) при очень низком напряжении (порядка нескольких десятков вольт).

При работе системы УВЭИ высокое напряжение в межэлектродном пространстве инициирует процессы колебательного возбуждения, диссоциации молекул и ионизации атомов газа, что резко увеличивает количество частиц с энергией, превышающей порог энергетического барьера химической реакции горения, за счёт чего и обеспечивается воспламенение топливной смеси при низкой температуре.

При работе электродугового плазматрона напряжения на дуге недостаточно ни для диссоциации молекул, ни для ионизации атомов газа, и процесс воспламенения обеспечивается только за счёт теплого воздействия плазмы электрической дуги путём увеличения кинетической и колебательной энергии атомов и молекул.

Электрическая дуга «горячего» плазматрона имеет высокую температуру на уровне 3000 – 5000 К [4]. При этой температуре воспламеняется не только угольная пыль, но также испаряется минеральная часть топлива, провоцируя тем самым шлакование горелки. Для обеспечения работы плазматрона с такими характеристиками процесса необходим источник питания высокой мощности. Электродный блок плазматрона, находящийся в зоне очень высоких температур, требует эффективной защиты, но даже в этом случае имеет низкий ресурс работы.

В процессе воспламенения топливной смеси в обоих рассматриваемых электрических разрядах формируется характерное излучение. Для системы УВЭИ и «горячего» плазматрона превалирующие зоны излучения (рис. 2) лежат в разных областях. Излучение «горячего» плазматрона в силу своей особенности охватывает широкий спектр, большая часть которого лежит в инфракрасной зоне — в области термоактивации молекул. Это излучение имеет малую энергию и соответственно низкое влияние на химическую активность топливной смеси. У электрического разряда системы УВЭИ спектр излучения более узкий, но лежит в зоне более высоких энергий, прилегающей к ультрафиолетовому диапазону, и, как следствие, он оказывает существенно большее воздействие на химическую активность компонентов топливной смеси.

Наибольшей проблемой разработки систем УВЭИ является понимание процессов химической кинетики для плазмохимической реакции воспламенения топливной смеси. Именно оно обеспечивает возможность качественного компьютерного моделирования для получения оптимальных технических решений.

При компьютерном моделировании процессов горения активно используется зависимость скорости химической реакций от температуры с учётом сопутствующих факторов — уравнение Аррениуса:

$$k = \mathrm{A}e^{-E_a/RT},$$

где k — константа скорости химической реакции; A — предэкспоненциальный множитель вида реакции (может интерпретироваться как максимально возможная доля молекул, способных вступить в реакцию); e — основание натурального логарифма (2,71828...); E_a — энергия активации или пороговая энергия, определяющая высоту энергетического барьера на пути химической реакции; R — универсальная газовая постоянная (8,314 Дж/мольК); T — температура, К.

Однако уравнение Аррениуса справедливо при условии термодинамически равновесных процессов и максвелло-больцмановского распределения частиц по энергиям. Эти условия не соблюдаются для процессов, протекающих в низкотемпературной плазме. В реакциях низкотемпературной плазмы активация реагентов идёт за счёт нетермического воздействия при взаимодействии с электронами и фотонами. В результате такого взаимодействия в качестве химически активных частиц выступают возбуждённые молекулы, атомы, радикалы и ионы. Такие активированные реагенты не находятся в термическом равновесии с остальными частицами, а концентрации продуктов реакции, как правило, больше равновесных термодинамических. Кроме того, скорость реакций с нетермическим способом активации практически не зависит от температуры [7] и соответственно не может моделироваться при помощи уравнения Аррениуса.

Необходимо учитывать, что процесс с УВЭИ только инициирует воспламенение при низкой температуры реагентов, после чего основной энергетический вклад в развитие реакции горения происходит за счёт чисто химических реакций горения, характеризующихся высоким тепловыделением, которые подхватывают процесс. Удельный вес такого теплового энергетического вклада приближается к 99 %. Исходя из данного сценария воспламенения и горения топлива с участием УВЭИ, можно считать процесс «квазиравновесным» [7], а для таких процессов уже можно пользоваться положениями химической кинетики с некоторыми допущениями.

Учёт начального этапа воспламенения холодных реагентов можно приближённо моделировать уравнением

Упрощённая классификация способов инициации горения топлива

Способы активации	Механизм действия	Применение
Термический	Увеличение температуры T как классический приём ускорения химических реакций (правило Ван-Гоффа)	Нагрев компонентов топливной смеси по отдельности и вместе различными методами: нагрев с помощью теплообменников, муфели, плазменная технология и т. п.
Каталитический	Снижение энергии активации (E_a) в уравнении Аррениуса, т. е. снижение порога энергетического барьера для прохождения химической реакции	Применение катализаторов, микродобавки в топливо, совместное сжигание с высокореакционным топливом, механоактивация топлива и др.
Электроионизационный	Поэтапное воспламенение с локализацией процесса в неравновесной плазме с обнулением энергии активации (E_a) в уравнении Аррениуса, путём инициации достаточного для локального воспламенения количества частиц (активирующего комплекса кинетических реакций) при низкой температуре	Воздействие электрического поля, достаточного для запуска процессов ионизации с ионизирующим излучением на зоны воспламенения факела

Аррениуса с энергией активации, равной нулю, локализуя этот эффект в области собственно разряда. При дальнейшем развитии процесса в модели такое локальное воздействие на компоненты реагентов, продукты реакции и тепловой результат должны продолжать учитываться в виде автономной, самостоятельной части процесса. Похожий способ приближённой оценки кинетических параметров с использованием уравнения Аррениуса приведён, например, в [8 – 10].

Исходя из приведённого анализа механизмов воспламенения, можно сформулировать следующие основные подходы к сжиганию топлива (см. таблицу). Такое представление в некотором смысле условно, так как в процессе непосредственно горения присутствуют все механизмы, перечисленные в таблице. Однако, для целей настоящей статьи считаем необходимые упрощения обоснованными, и для описания начальной стадии воспламенения принимаем представленные упрощённые механизмы протекания химической реакции.

Сравнивая способы активации с использованием плазматрона и системы УВЭИ, можно заметить, что воспламенение в данных технологиях происходит с помощью разных механизмов: у плазматрона — с помощью термического, а у системы УВЭИ — электроионизационного способа активации. При этом, исходя из анализа уравнения Аррениуса для системы УВЭИ, видно, что запуск реакции воспламенения может не зависеть от температуры.

Объяснение существенного различия в потребляемой мощности системы УВЭИ и «горячего» плазматрона связанно с тем, что мощность системы УВЭИ используется только для химической активации топливной смеси, происходящей с образованием высокореакционной области своеобразного «химического реактора» воспламенения топлива. После образования такой локальной зоны воспламенения выделяется тепловая мощность от запущенной химической реакции горения самого топлива, в сотни раз привышающая мощность системы УВЭИ, чем обеспечивается ступенчатость реакций горения в большем масштабе.

Технология УВЭИ уже была опробована на тепловых станциях Иркутскэнерго, на Красноярской ГРЭС-2 в 2019 г., где получен положительный опыт работы и полностью подтверждены теоретическая и экспериментальная составляющие технологии на действующих энергетических котлах.

В 2020 г. в Институте теплофизики СО РАН (г. Новосибирск) организован новый испытательный стенд (рис. 3) для проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ на базе установки тепловой мощностью 5 МВт. Стенд представляет собой циклонное горелочное устройство с осевыми и тангенциальными подводами топливной и воздушной составляющих воспламеняемой смеси. Он оборудован необходимыми датчиками и системой непрерывного мониторинга для анализа проводимых экспериментов.

Новые подходы в использовании горелочных устройств циклонного типа в сочетании с системой УВЭИ позволяют увеличить мощность и эффективность воспламенения пылеугольного топлива за счёт увеличения времени нахождения угольных частиц в зоне активации. За счёт реализации вариантов данного способа удаётся снизить унос несгоревшей угольной пыли в объём топочного пространства, тем самым обеспечить безопасный режим растопки из холодного состояния. В отличии от горелок новых конструкций с УВЭИ, для использованных до этого прямоточных горелок пока не было найдено эффективных решений проблемы уноса и полной безопасности растопки. При работе такого вида прямоточных растопочных горелок невоспламенившаяся угольная пыль, унесённая в топку, оседает на поверхностях нагрева, что потенциально может привести к взрывоопасным ситуациям.

Циклонное растопочное устройство с системой УВЭИ позволяет уменьшить

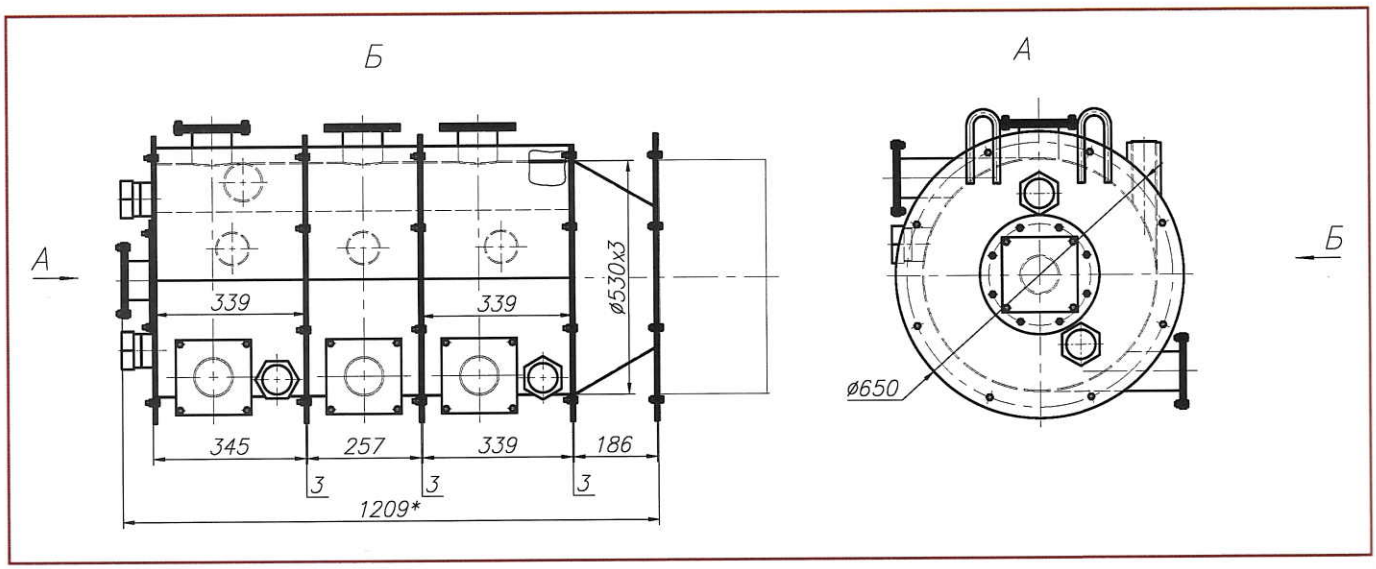


Рис. 3. ***Испытательный стенд горелочного устройства***

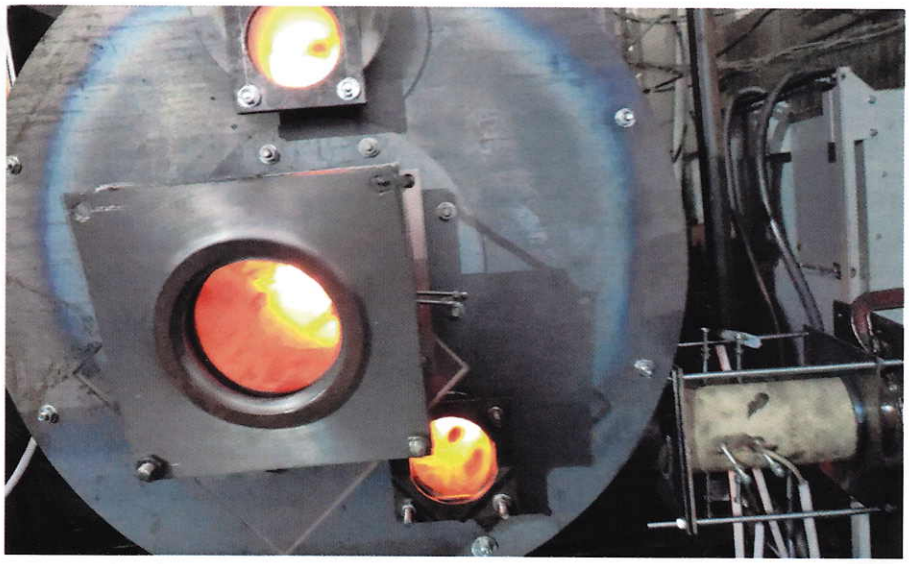


Рис. 4. ***Горячие испытания опытного циклонного горелочного устройства***

продолжительность разогрева горелочного устройства и стабилизации процесса горения факела. Использование циклона имеет ещё одно дополнительное преимущество, которое позволяет работать на двух сортах топлива, смешивая их уже непосредственно в объёме горелки, и манипулировать расходами каждого компонента в зависимости от ситуации.

В начале 2020 г. на циклонной горелке, представленной на рис. 4, проведены успешные работы по опытному сжиганию различных марок углей с разных угольных разрезов. Экспериментальная работа в данном направлении продолжается.

В настоящее время ООО «КОТЭС Инжиниринг» предлагает внедрение технологии безмазутного ионизационного розжига пылеугольных котлов «под ключ», включая модернизацию горелочных устройств в привязке к конструкции котла, комплексную установку системы УВЭИ, а также подключение специальной системы мониторинга, встраиваемой в АСУ ТП электростанции.

Специалисты КОТЭС-Инжиниринг и НГТУ ведут проработки вариантов ТЭС с полным исключением мазута из технологического цикла станции. Стоит отметить, что на некоторых электростанциях Китая уже полностью отказались от использования и хранения высокореакционного топлива на угольных электростанциях в пользу безмазутной плазменной технологии растопки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зверева Э. Р., Фарахов Т. М.* Энергоресурсосберегающие технологии и аппараты ТЭС при работе на мазутах: Под ред. А. Г. Лаптева. — М.: Теплотехник, 2012. — 181 с.

2. *Клыш Е. А., Клыш Р. А., Бочкарев В. А.* Опыт применения системы муфельной растопки и подсветки факела на котельном агрегате ТП-81, станционный № 7, ТЭЦ-11 ОАО «ИРКУТСКЭНЕРГО» // Вестник ИрГТУ. 2012. № 7 (66). С. 159 – 164.

3. *Разина Г. Н.* Переработка углеродсодержащих веществ в низкотемпературной плазме: Учеб. пособ. — М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2004. — 81 с.

4. *Мессерле В. Е.* Использование плазменно-топливных систем на пылеугольных тепловых электростанциях / В. Е. Мессерле, А. Б. Устименко, Н. Б. Нагибина, В. А. Матвеев: VIII Всерос. конф. с междунар. участием «Горение твёрдого топлива» института теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 13 – 16 апреля 2012 г.

5. *Карпенко Е. И.* Использование плазменно-топливных систем на ТЭС России, Казахстана, Китая и Турции / Е. И. Карпенко, Ю. Е. Карпенко, В. Е. Мессерле, А. Б. Устименко: V Междунар. симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии. XII Школа по плазмохимии для молодых ученых России и стран СНГ. 2008.

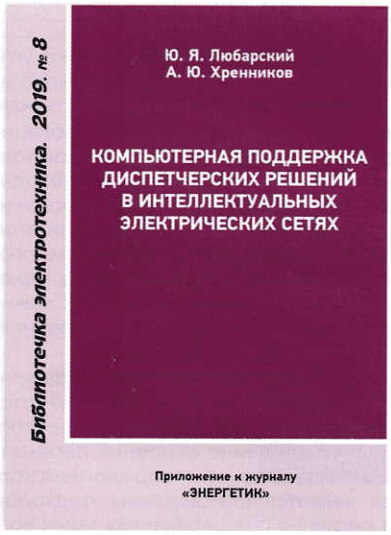
6. *Патент РФ № 2009128266/06.* Плазменный запальник для воспламенения пылеугольного топлива / Ю. И. Наумов // Бюл. Изобретения. 2009. № 27.

7. *Власов В. В.* Физико-химические процессы в низкотемпературной плазме (основы плазмохимии). — Харьков: Харьковский национальный университет им. В. Н. Карамзина, 2011. — 163 с.

8. *Fridman A.* Plasma Chemistry. — New York: Cambridge University Press, 2008. — 978 p.

9. *Русанов В. Д.* Физика химически активной плазмы. — М.: Наука, 1984. — 414 с.

10. *Кудряшов С. В.* Превращение углеводородов различных классов в барьерном разряде: Дисс. ... доктора хим. наук. — Томск: Институт химии нефти СО РАН, 2016.



Вышел в свет
журнал «Библиотечка электротехника» — приложение к журналу «Энергетик»
Выпуск 8(248) 2019 г.

ЛЮБАРСКИЙ Ю. Я., ХРЕННИКОВ А. Ю.

КОМПЬЮТЕРНАЯ ПОДДЕРЖКА ДИСПЕТЧЕРСКИХ РЕШЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Для «умных» электрических сетей рассмотрены интеллектуальные программные средства, выполняющие новые функции и повышающие уровень компьютерной поддержки диспетчерских решений. Учитывая, что одна из целей построения умных сетей — обеспечение восстановления после аварий, основное внимание в брошюре уделяется проблемам диагностики нештатных ситуаций, интеллектуальному мониторингу состояний электрических сетей, планированию послеаварийного восстановления электроснабжения. Подробно рассмотрен новый вид программного тренажёра для диспетчеров электрических сетей — тренажёр анализа нештатных ситуаций. Изложение сопровождается множеством примеров в форме протоколов работы реальных интеллектуальных систем.

Брошюра предназначена для руководителей и специалистов оперативных служб предприятий энергетических систем, электрических и распределительных сетей и электрических станций, филиалов ПАО «Россети», ПАО «ФСК ЕЭС», слушателей курсов повышения квалификации, а также студентов электроэнергетических специальностей.