

## Перспектива применения АСУ с плазменным розжигом угля в условиях Крайнего Севера

*А.А. Халимов<sup>1</sup>, М.Р. Санатуллин<sup>1</sup>, И.О. Сторожев<sup>1</sup>, И.М. Сафаров<sup>1</sup>,  
Д.С. Крехов<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Казанский Государственный Энергетический Университет, г. Казань*

*<sup>2</sup>Уфимский Государственный Нефтяной Технический Университет, г.Уфа*

**Аннотация:** В статье был проведен обзор современных автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) котельных установок повышенной эффективности, а также расчет экономической эффективности внедрения АСУ ТП. Был разработан план внедрения АСУ ТП котельной установки повышенной эффективности для условий крайнего севера. Обсуждение. Плюсы и минусы от внедрения АСУ ТП. С целью снижения затрат ресурсов на котельных установках в условиях Крайнего Севера, был предложен план внедрения АСУ ТП с плазменным розжигом угля. Критериями оценки эффективности плана является экономия в денежном эквиваленте.

**Ключевые слова:** энергетические ресурсы, энергетика, котельная установка, АСУ технологическими процессами.

### Введение

В современном мире растет спрос на новые источники энергии и усилия многих учёных направлены на решения данной проблемы. Однако, при детальной оценке экономической и экологической целесообразности их использования, зачастую приходится возвращаться к традиционным источникам энергии, таким, как уголь. Несмотря на усилия, ориентированные на изучение альтернативных источников энергии, при перманентно растущей потребности на энергию, мир все равно вынужден возвращаться к доказавшим свою надежность со временем топливно-энергетическим составляющим, а именно – углю, который является теплоносителем в энергетике в абсолютном большинстве стран [1]. Энергетическая политика Российской Федерации предусматривает рост спроса на уголь в топливно-энергетическом комплексе до 2020г, в связи с вводом угольных тепловых электростанций (ТЭС), в соответствии с энергетической стратегией РФ на период до 2020г. Ожидаемый рост доли угля должен составить до 44,4 %, в структуре потребления топлива. Однако в связи с запущенным в последние десятилетия процессом замещения угля

---

природным газом, механизмы по осуществлению программы работают плохо. Скорость внедрения автоматизированной системы управления технологическими процессами на данном этапе – 5% в год от общего количества котельных установок. На 2020 год автоматизировано 15% котельных установок в регионах, приравненных к Крайнему Северу.

Планируемый прирост генерирующих мощностей в Европе по видам топлива в 2005-2030г. представленный в виде графика на рис.1.

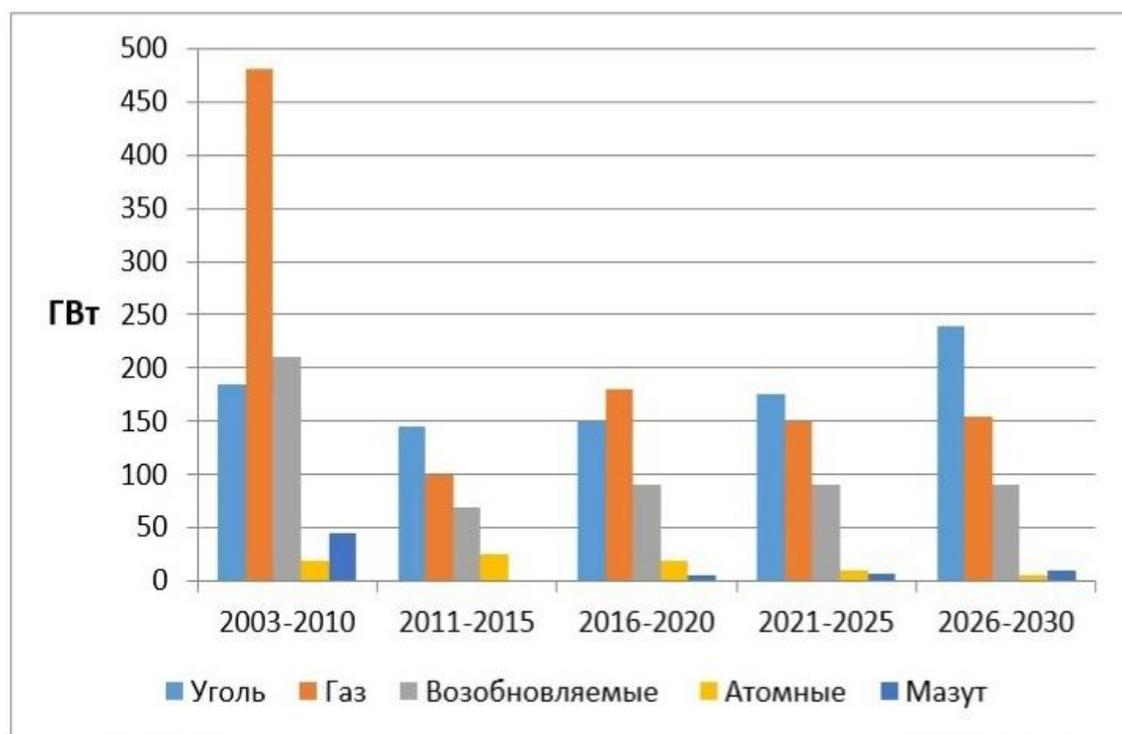


Рис.1. Прирост генерирующих мощностей в мире по видам топлива в 2005-2030г.

По данным аналитического центра Ember, в мире доля генерации мощностей углем составляет 40%, в Польше 96%, Китае 80%. Россия имеет запасы угля, дающие возможность поддерживать генерирующую способность в течение 500 лет. На данный момент доля составляет 18%. Угли Сибирских месторождений представлены различными видами в полном марочном объеме от бурых до антрацитов.

Новизна работы заключается в расчете экономической эффективности от внедрения автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) котельной установки (КУ) для повышения ее эффективности в условиях Крайнего Севера.

### Литературный обзор

В работе рассматривается автоматизация котельных на угле, так как уголь самый распространённый вид топлива [2]. Тепловой коэффициент энергоресурсов с учетом современных технологий обработки топлива показан в таблице 1.

Таблица 1

Тепловой коэффициент энергоресурсов с учетом современных технологий обработки топлива [3]

Тип топлива	Тепловой коэффициент
Торф	0,7
Каменный уголь	1,0
Дизель	0,9
Мазут	1,6

В [4] авторы анализируют совместные тенденции энергетического рынка. Невзирая на ожидаемый спад угольных котировок по завершении отопительного сезона, сейчас на угольном рынке прогрессирует следующий повышательный импульс с точкой отсчета в Азии. При этом ощутимый рост цен на жизненно важные для возобновляемых источников энергии (ВИЭ) металлы будет под вопросом для альтернативной энергетики в будущем. Нельзя не учесть и скачок на энергетических рынках, в первую очередь, газовом, и рост торговли квотами на выбросы CO<sub>2</sub> на ступень выше €50 за т., что влечет за собой обоснованное повышение цен на электроэнергию в

экономиках с рыночным ценообразованием. По данным источника [5 с. 3], на рис. 2 мы наблюдаем квартальную динамику котировок энергетического угля.



Рис. 2 Квартальная динамика котировок энергетического угля.

На рис.2 видно, что цена котировок энергетического угля на конец первого квартала 2021 догоняет цены начала первого квартала 2019. Цены на уголь выросли на 36% от минимума кризисного 2020 года в Австралии до 81% в Европе.

Источники теплоснабжения в России можно подразделить по принадлежности [6] на:

- ТЭС и теплоэлектроцентраль (ТЭЦ);
- частные ТЭС и котельные (164 ТЭС и ТЭЦ с отпуском теплоты);
- муниципальные котельные (57 тыс);

- автономные индивидуальные теплогенераторы (более 600 тыс.)

Авторы [5 с.15] считают правдивым то, что правительство ожидает снижение темпов добычи угля в Российской Федерации в 2021-2024 гг. и прогнозирует на нынешний год объем добычи на уровне 389,5 млн т. В 2023 г. ожидается сохранение объемов добычи, а в 2024 г. объем добычи возрастет до 420 млн т. В свою очередь, Минэкономразвития дает базовый и консервативный прогнозы (от сен.2020 г.), согласно которым ожидают плавное наращивание после резкого падения показателя добычи на 9% по итогам 2020 г. Прогнозы добычи угля в России показаны на рис.3. Динамика внутренних и экспортных цен на энергетический уголь показана на рис.4.

Данные, полученные в [5 с. 17], хорошо коррелируются с российскими исследованиями в [6] и англоязычными в [7].



Рис. 3. Прогнозы добычи угля в России

На рис. 3 можем видеть, что теоретический рост добычи угля в России к 2024 году составит от 6% (Прогноз Минэкономразвития) до 36% (Прогноз из развития угольной промышленности до 2035 г.: оптимистический).

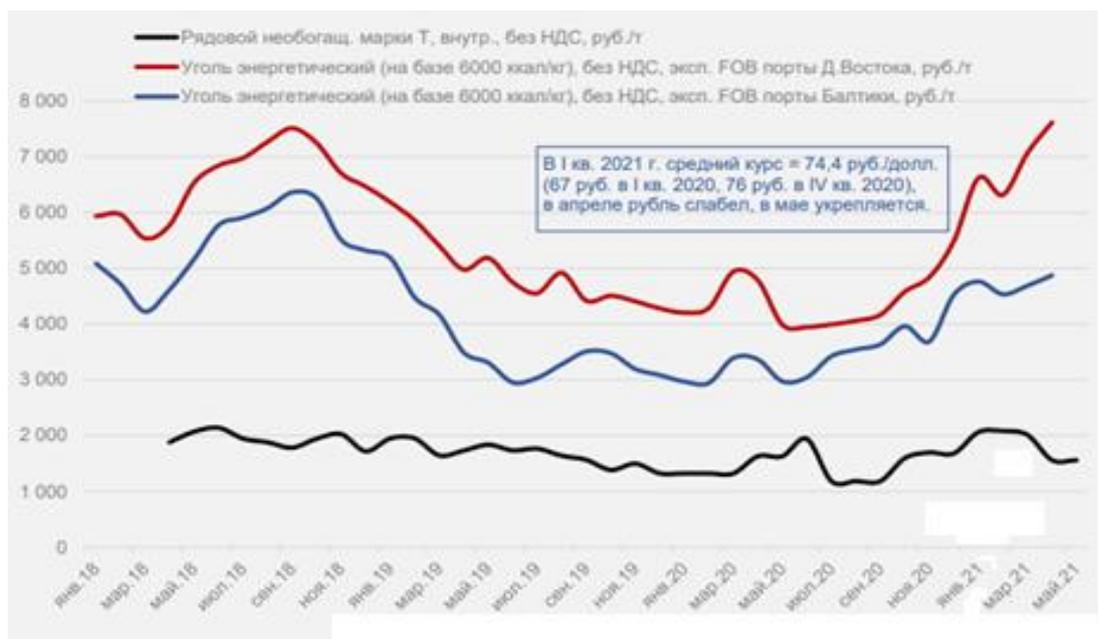


Рис. 4. Динамика внутренних и экспортных цен на энергетический уголь

На рис.4 видно, как в марте 2021 спрос на угли марки Т на внутреннем рынке стал ограничен, потому что данная продукция предназначена на экспорт. Вследствие этого, поставщики Кузнецкого угольного бассейна стремились поднять цены на внутреннем рынке, аргументируя такое ценообразование повышенным спросом на зарубежных рынках – предложения, превышающие 4000 руб./т.

### Материалы и методы исследования

АСУ ТП КУ повышенной эффективности для условий Крайнего Севера гарантирует обеспечение назначенной температуры теплоносителя с учетом температуры атмосферного воздуха путем изменения мощности котлов или добавлением обратной сетевой воды.

АСУ ТП топливоподдачи и топливоприготовления КУ основана на микропроцессорной технике, и является структурой, работающей по принципу функционально-группового управления и реализована на трёх уровнях:

- полевой (датчики и исполнительные механизмы),
- средний (щит управления),

- верхний (терминал оператора).

Структурная схема АСУ ТП представлена на рисунке 5.

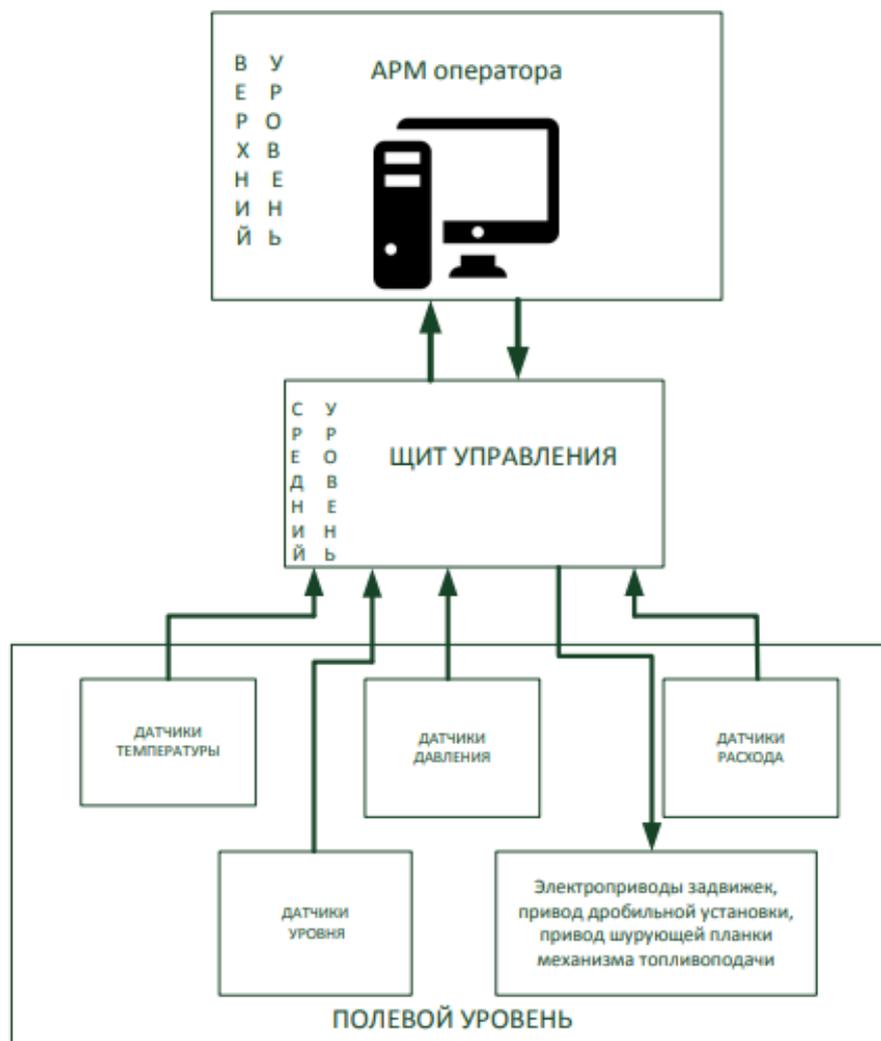


Рис. 5 Структурная схема АСУ ТП топливоприготовления и топливоподачи твердотопливной КУ.

Нижний уровень требуется для управления механизмом топливоподачи и управления расходом топлива в соответствии с тепловым расходом.

Средний уровень предназначен для контроля за технологическими параметрами КУ и выполнения защитных функций в соответствии с нормативной документацией.

Верхний уровень (рабочее место оператора) отображает поступающие данные на графиках и мнемосхемах, передает команды оператора системе

управления среднего уровня, а также регистрирует и отправляет в архив текущие события.

Необходимость разработки новых технологий применения топлива обосновывается в [2 с.105]. На данный момент технология сжигания угля в топке с помощью плазменного розжига горелкой на угольной пыли считается одной из самых перспективных. Эта технология позволяет заменить дорогостоящие газ или нефтепродукты на более дешевый уголь.

Вышеперечисленные факторы занимают особое место в вопросах теплоэнергетики, где применяются котлы малой производительности с пылеугольными горелками турбулентно-вихревого типа. Стандартный режим работы для таких котлов – работа с переменной тепловой нагрузкой. Это означает, что, в зависимости от числа потребителей и времени суток, нагрузка может изменяться в пределах от 50 до 100% мощности котла. Основным недостатком такого режима работы является потребность в постоянной мазутной подсветке пылеугольных горелок, что подразумевает повышенный расход мазута, и превращение его практически во второе основное топливо котла.

Совмещенное сжигание угля и обладающего более высокой реакционной способностью мазута воздействует на эколого-экономические показатели котлов: на 10-15% возрастает мехнедожог топлива и на 2-5% понижается коэффициент полезного действия-брутто, повышается скорость высокотемпературной коррозии экранных поверхностей, снижается надежность эксплуатации котельного оборудования, на 30-40% увеличивается выход оксидов азота и серы (за счет более высокого содержания серы в мазуте), появляются выбросы канцерогенной пятиокси ванадия.

Для снижения расходов мазута при использовании низкосортных углей используются следующие методы: отдельное и смешанное сжигание угля и

---

топлива для подсветки (мазута), реконструкция горелочных устройств, высокий предподогрев воздуха и пылевоздушной смеси и т.д. Однако данные методы не способны решить вопрос понижения расхода жидкого топлива. В таблице 2 представлены цены на типовые виды топлива для тепловой энергетики на период 2016-2020 гг.

Таблица 2

Цены и соотношения на основные виды топлива для тепловой энергетики в 2016-2020 гг. в РФ.

	2016	2017	2018	2019	2020
Уголь, руб/т (у.т)	2002	2151	2211	2213	2385
Газ, руб/т (у.т)	3318	3449	3562	3634	3732
Нефтетопливо, руб/т (у.т)	10559	9916	8594	12393	15714
Соотношение цены угля к газу	58%	61%	61%	60%	63%
Соотношение цены газа к нефтетопливу	31%	34%	41%	29%	24%
Соотношение цены угля к нефтетопливу	19%	22%	25%	18%	15%

В промежутке с 2016 по 2020 год, цены на уголь и газ стабильно росли, в то время, как цена на нефтетопливо испытывала сильные колебания в связи с переменами в организации налогообложения в нефтяном секторе, а также в соответствии с составом и объемами потребляемого топлива. Как видим, цена угля в 5-6 раз меньше цены нефтетоплива, что подтверждает целесообразность применения безмазутного воспламенения угля.

В настоящее время в теплоэнергетике начинают внедряться системы плазменной растопки котлов. В этих котлах применяются дуговые плазменные генераторы (плазматроны), которые отвечают за первичный

разогрев растопочной горелки. В ней происходит воспламенение угольной пыли мелкого помола и частичное ее сгорание.

В статье [8 с.10] авторы рассказывают об удачном опыте использования этой технологии на ТЭС разных стран, таких, как: Россия, Казахстан, Китай, Украина, Монголия, Сербия. В этой статье были изучены теоретические методы термохимической подготовки, плазменного воспламенения, газификации и сжигания углей. Прямоточная плазменно-топливная система показана на рис. 5.

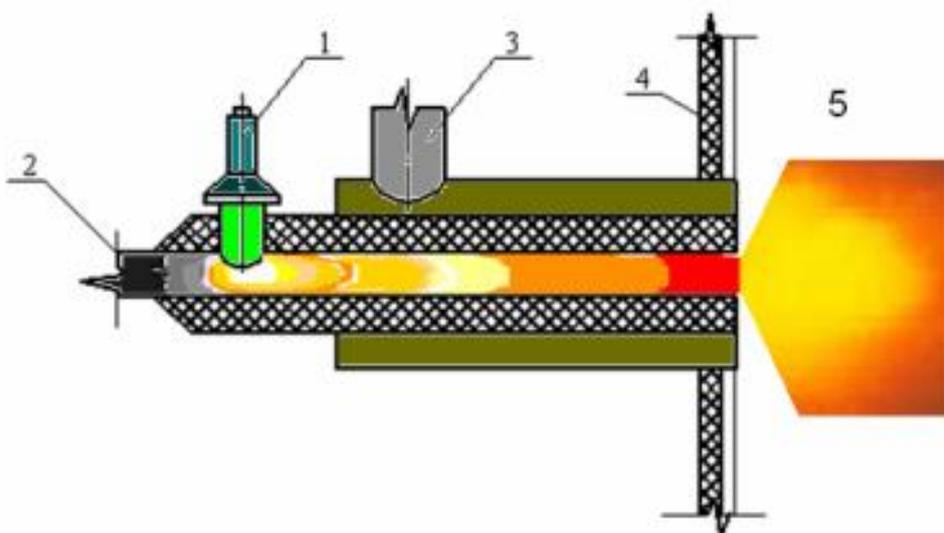


Рис.6 Прямоточная плазменно-топливная система: 1 - плазматрон, 2 – аэросмесь, 3 - вторичный воздух, 4 – стенка топки котла, 5 – топка.

Подобные системы давали достойный результат при их использовании на ряде с местными и иностранными электростанциями, и их очевидная экономичность по сравнению с традиционным мазутным розжигом не подвергается сомнениям.

При работе системы плазменного розжига и регулировки горения угольного топлива, авторами статьи [8 с.15], выявлены неблагоприятные условия. Для их устранения разрабатываются новые технологии розжига и подсветки пылеугольного топлива. При использовании методики плазменного розжига, в относительно большом количестве выделяются

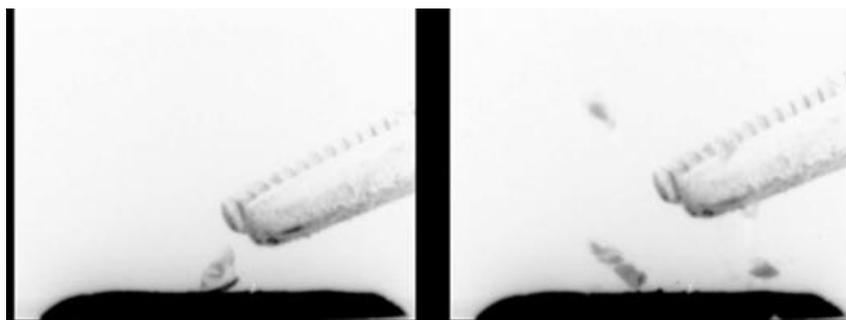
аэрозоли сложного химического состава и взвешенные частицы, которые проникают далеко внутрь дыхательных путей, поскольку имеют значительную степень дисперсности.

АСУ ТП для подсветки угля в кипящем слое в топке водогрейного котла КВм-2,5 может быть двух вариантов. Первый вариант состоит из дробильной установки, ленточных конвейеров, установки для подсушивания и мельницы для перемалывания. На выходе этой системы, размер частиц должен быть в районе 3-5 мм. Во втором варианте подготовки угля к сжиганию, уголь перемалывается в дробилке на более крупные фракции, чем в первом варианте. Затем топливо подается сразу в топку, минуя подсушивание и дополнительное перемалывание в мельнице, где под воздействием процесса диспергирования, крупные частицы распадаются на 2-3 частицы меньшего размера (около 2-4 мм). Процесс диспергирования – это сложный физический процесс разделения на более малые частицы под воздействием сложных механических эффектов при активации частиц твердого топлива. Частицы угля диспергируют (разделяются) на несколько частиц в результате реакции водяных паров и углерода внутри самой частицы угля. Этот процесс особенно хорошо виден при применении каменного угля или антрацита. Мы можем увидеть его на рисунке 7.

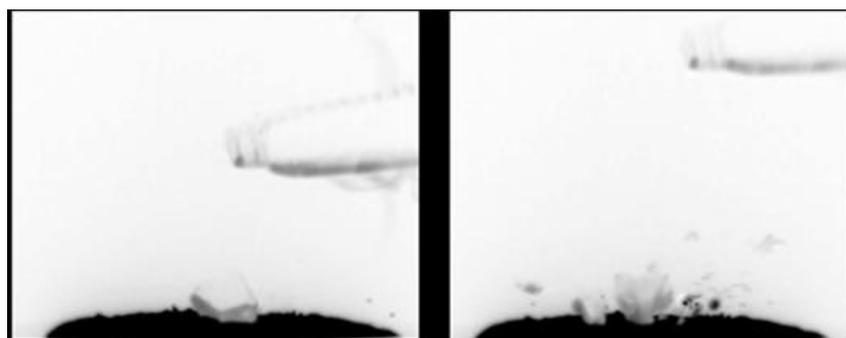
Однако, при зажигании частиц бурого угля, эффект диспергирования не происходит. Объяснение этому - его малая плотность. Бурый уголь имеет пористое строение, поэтому в процессе сжигания пары и различные летучие соединения свободно выходят из частиц угля. Частицы каменного угля имеют среднюю плотность, в результате чего диспергирование происходит слабо. Пары и летучие соединения могут найти выход через поры частицы и не участвуют в процессе, поэтому в результате откалывается лишь несколько маленьких частиц. Наилучшим вариантом для диспергирования угля является антрацит. За счет высокой плотности, при высоких температурах

---

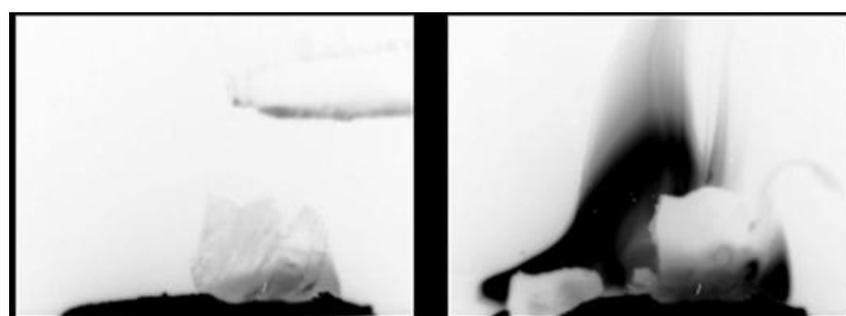
летучие вещества и пары не просачиваются через поры частицы. Частица угля делится на 2-3 части под воздействием сил диспергирования. Таким образом, процесс диспергирования имеет прямую пропорциональную зависимость от плотности угля. Чем плотнее уголь, тем сильнее в нем протекает процесс диспергирования.



7.1 Инертный прогрев      Диспергирование частиц



7.2 Инертный прогрев      Диспергирование частиц



7.3 Инертный прогрев      Диспергирование частиц

Рис. 7 Кадры видеогаммы зажигания частиц антрацита и его диспергирования при  $t=900\text{ }^{\circ}\text{C}$ : 7.1 – размер частиц 2 мм, 7.2 – размер частиц 4 мм, 7.3 – размер частиц 6 мм.

Для значительного упрощения процесса топливоприготовления применяется процесс диспергирования при сжигании угля [9], что обуславливает использование более влажного топлива и крупных частиц угля. Данный процесс не имеет значительной сложности при подготовке топлива, так как размер частиц угля должен быть в диапазоне от 5 мм до 25 мм, что дает возможность исключить измельчение топлива до пылевидного состояния.

Таким образом, мы можем выделить основные преимущества и недостатки применения диспергирования угля при подготовке к сжиганию в кипящем слое в топке водогрейного котла.

**Преимущества:** отсутствие необходимости использования сушильной камеры и дополнительной мельницы для перемалывания частиц до размеров 3-5 мм, что означает также отсутствие затрат на работу этих агрегатов и упрощения обслуживания котла.

**Недостатки:** повышенная требовательность к качеству угля, невозможность применения бурого угля для плазменного поджигания угольной смеси.

Расходы всех потребителей, касающиеся энергосбережения Крайнего Севера, достаточно велики и в настоящее время эти затраты равны 1,7 триллионам рублей. Данные расходы связаны с дорогостоящим децентрализованным энергоснабжением, а также низким коэффициентом энергетической эффективности [10].

В целях упрощения процесса топливоприготовления применяется диспергирование угля при сжигании топлива, что, в конечном счёте, уменьшает годовые затраты на 28,9%.

### **Обсуждение**

Экономическая оценка энергоэффективности углеэнергетических технологий изложенной в [11] и [12].

---

Плюсами внедрения АСУ ТП являются следующие пункты:

- Улучшение качества продукции;
- Снижение стоимости продукта;
- Обеспечение безопасности;

АСУ ТП будет круглосуточно следить за всеми данными с датчиков, и автоматически регулировать процесс подачи теплоносителя в сеть, вследствие чего в производстве будет сведен к минимуму человеческий фактор. В нашей работе были приведены современные способы повышения эффективности производства за счет улучшения качества обработки топлива, повышения качества переработки топлива в энергию с целью понижения стоимости производства тепла. Также подключение АСУ ТП дает возможность мгновенной остановки производства в случае чрезвычайных обстоятельств.

Минусы внедрения АСУ ТП:

- Рост безработицы;
- Трудоёмкость;
- Техническая уязвимость;

Высокоинтеллектуальные процессы, требующие создания мощного искусственного интеллекта, по-прежнему контролируются людьми, но нужда в обходчиках постепенно падает, из-за чего многие квалифицированные кадры лишаются своих рабочих мест. Внедрение автоматизации в производство, пусть даже выборочной, требует крупных финансовых вложений. Многие предприятия попросту не имеют возможности инвестировать в подобные проекты и вынуждены придерживаться модели труда, доказавшей свою прибыльность. Там, где повышается человеческая безопасность – понижается безопасность техническая.

## Заключение

Подводя итоги вышеперечисленных исследований, можно утверждать о значительной эффективности плана по снижению затрат благодаря внедрению более современной АСУ ТП в области котельных установок для регионов Крайнего Севера. Были рассмотрены варианты экономии ресурсов и перехода с нефтетопливного розжига котла на плазменный с использованием дробленого угля. В ходе работы были проанализированы основные преимущества и недостатки.

В процессе литературного обзора была выявлена экономическая целесообразность применения более современной АСУ ТП, рассмотрены тенденции по добыче угля в России и проведен анализ внутренних и общемировых цен на уголь, что показало высокую целесообразность перехода с мазутного розжига на плазменный.

Предметом исследования была АСУ ТП с системой плазменного розжига котла. Данная система использует поджиг угля мелкой фракции для розжига котла вместо розжига нефтепродуктами, в основном мазутом, благодаря чему пропадает необходимость использования более дорогого мазута. Кроме экономического преимущества, также эта система повышает надежность эксплуатации котлового оборудования из-за снижения высокотемпературной коррозии.

С учетом скорости автоматизации в России, повсеместное внедрение АСУ ТП повышенной эффективности для условий Крайнего Севера наступит в 2040 году, что поможет сэкономить до 30% от нынешних затрат этих регионов. Эта сумма составляет 500 млрд. рублей ежегодно, что, в свою очередь, занимает 10% от объема затрат на энергоснабжение всех субъектов Российской Федерации.

## Литература

1. Семенец А.А. Безмазутная растопка котла // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова – Белгород, 2015. - С. 378-380.
  2. Сергеев В.В. Топливо и теория горения. Часть 2 Теория горения: Учебное пособие. Санкт-Петербург: СПбГТУРП, 2011. - 142 с.
  3. Ermolaev D.V., Timofeeva S.S., Islamova S.I., Bulygina K.S., Gilfanov M.F. A comprehensive study of thermotechnical and thermogravimetric properties of peat for power generation.// Biomass Conversion and Biorefinery. – 2019. – V. 9 – pp.767–774. URL: [doi.org/10.1007/s13399-019-00472-8](https://doi.org/10.1007/s13399-019-00472-8) (Дата обращения: 15.10.2021).
  4. Nicholson M. Additives improve fuel oil properties // Bunker world.– San Diego, 2005. - P.12.
  5. Аналитический обзор рынка угля // Корпоративный журнал ОАО "УГМК". URL: [ugmk.com/upload/medialibrary/ef6/Obzor-rynka-uglya\\_1-plg-2021.pdf](http://ugmk.com/upload/medialibrary/ef6/Obzor-rynka-uglya_1-plg-2021.pdf)
  6. Кавешников Н.Н. Стратегия Европейского Союза в области климата и энергетики // Современная Европа – 2015. – №1(61).–С. 93-103.
  7. World energy Outlook 2021. URL: [iea.org/reports/world-energy-outlook-2021](https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021)
  8. Rojas-Pérez F., Castillo-Benavides J. A., Richmond-Navarro G. et al CFD Modeling of Plasma Gasification Reactor for Municipal Solid Waste// IEEE Transactions on Plasma Science – Los Alamos, 2018. – №5. – pp. 2435-2444.
  9. Раимова А.Т. Некоторые пути энергосбережение в производственном секторе // Энергетика: состояние, проблемы, перспектив – Оренбург, 2018. – С.22-25.
  10. Башмаков И.А. Оценка расходов на энергоснабжение в регионах Крайнего Севера. Москва: ЦЭНЭФ, 2017. - 108 с.
-

11. Петров И.В. Экономическая оценка энергоэффективности углеэнергетических технологий // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 81. – С. 180-189.

12. Сафаров И.М., Давлетхузина Э.М., Ишмухаметова Д.М., Баширова Л.И., Садыков Р.Д., Хлебников Д.А. Состояние уровня автоматизации энергетических объектов и решения, направленные на его повышение // Инженерный вестник Дона, 2021, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2021/7382

### References

1. Semencz A.A. Mezhdunarodnaya nauchno-texnicheskaya konferenciya molody`x ucheny`x BGTU im. V.G. Shuxova. Belgorod, 2015. pp. 378-380.

2. Sergeev V.V. Toplivo i teoriya gorenija. Chast` 2 Teoriya gorenija: Uchebnoe posobie. [Fuel and combustion theory. Part 2 Combustion Theory: Study Guide]. Sankt-Peterburg: SPbGTURP, 2011. 142 p.

3. Ermolaev D.V., Timofeeva S.S., Islamova S.I., Bulygina K.S., Gilfanov M.F. A comprehensive study of thermotechnical and thermogravimetric properties of peat for power generation. Biomass Conversion and Biorefinery. 2019. V. 9 pp.767–774. URL: doi.org/10.1007/s13399-019-00472-8

4. Nicholson M. Bunker world. San Diego, 2005. p.12.

5. Analiticheskij obzor rynka uglja. [Analytical review of the coal market] Korporativnij zhurnal OAO "UGMK". URL: ugmk.com/upload/medialibrary/ef6/Obzor-rynka-uglya\_1-plg-2021.pdf

6. Kaveshnikov N.N. Sovremennaya Evropa. 2015. №1 (61). pp. 93-103.

7. World energy Outlook 2021. URL: [iea.org/reports/world-energy-outlook-2021](https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021)

8. Rojas-Pérez F., Castillo-Benavides J. A., Richmond-Navarro G. IEEE Transactions ofdnjhsn Plasma Science. Los Alamos, 2018. №5. pp. 2435-2444.



9. Raimova A.T. Energetika: sostoyanie, problemy, perspektivy. Orenburg, 2018. pp.22-25.

10. Bashmakov I.A. Ocenka rashodov na energosnabzhenie v regionah Krajnego Severa. [Estimation of energy supply costs in the regions of the Far North.] Moskva: CzENEF, 2017. 108 p.

11. Petrov I.V. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten. 2014. № 81. pp. 180-189.

12. Safarov I.M., Davletxuzina E`M., Ishmuxametova D.M., Bashirova L.I., Sadykov R.D., Xlebnikov D.A. Inzhenerny`j vestnik Dona, 2021, №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2021/7382](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2021/7382)