

На правах рукописи



ЦЕПЕНОК

Алексей Иванович

**РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ  
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НА ТЭС КАВИТАЦИОННОГО  
ЖИДКОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА**

Специальность 05.14.14 – тепловые электрические станции, их  
энергетические системы и агрегаты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

**Научный руководитель:** доктор технических наук, доцент,  
**Овчинников Юрий Витальевич**

**Официальные оппоненты:** **Дубровский Виталий Алексеевич**,  
доктор технических наук, доцент,  
Сибирский Федеральный Университет,  
профессор кафедры тепловых электрических станций

**Лебедев Борис Владимирович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
доцент кафедры парогенераторостроения и парогенераторных установок

**Ведущая организация:** Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

Защита диссертации состоится «06» декабря 2013 года в 13<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.02 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, Новосибирск, пр. К.Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета

Автореферат разослан «05» ноября 2013 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
д.т.н., профессор



Чичиндаев Александр Васильевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Развитие энергетики в России на ближайшие десятилетия связано с увеличением доли использования угля. В соответствии с энергетической стратегией, производство и потребление энергетических ресурсов в России будут возрастать, предполагается новый ввод мощностей на угольных ТЭС с КПД не менее 38%, строительство экспортных ТЭС. В такой ситуации логичным решением должно являться полномасштабное техническое перевооружение энергетики, основанное на замещении оборудования, выработавшего свой ресурс, оборудованием нового поколения. Экологические проблемы, возникающие при использовании угольного топлива, требуют разработки и внедрения новых технологий, которые вместе с экономической эффективностью обеспечивали бы существенный экологический эффект с максимальной высотой полнотой использования добытого топлива.

Одним из эффективных методов улучшения экологических показателей ТЭС и общей обстановки в регионах при обеспечении высоких КПД угольных энергоблоков является переход от традиционных технологий использования угля к новым технологиям его использования в виде кавитационного жидкоугольного топлива (КЖТ).

Кавитационные жидкоугольные топлива во многих случаях имеют более универсальные свойства по сравнению с твердыми и жидкими видами топлив, так как обладают качествами, как первого, так и второго вида, низкотоксичны во всех технологических операциях: приготовление, транспортирование, хранение, использование. Потенциал использования КЖТ обусловлен большой географией распространения и огромными запасами угольного топлива.

Развитие технологий использования водоугольных топлив в электроэнергетике в развитых странах производится по следующим направлениям: ПГУ с внутрицикловой газификацией ВУТ; ПГУ с прямым сжиганием глубокодеминерализованного ВУТ; паротурбинные установки со сжиганием ВУТ в паровом котле.

Дальнейшим развитием паротурбинных установок со сжиганием ВУТ в паровом котле является создание технологии использования на ТЭС КЖТ, при этом котлоагрегат оснащается специальной технологией сжигания с циклонными предтопками (ЦП).

**Целью работы** являются разработка, исследование новой технологии использования на ТЭС кавитационного жидкоугольного топлива, разработка методических подходов, математических моделей, методов расчета, рекомендаций по выбору конструктивно-компоновочных и расходно-термодинамических параметров новой технологии.

**Научная новизна** работы состоит в том, что в ней впервые получены и выносятся на защиту следующие наиболее важные результаты:

1. Разработанная методика исследования новой технологии использования на ТЭС КЖТ, которая отличается от известных тем, что учитывает изменение энергии активации, особенности горения КЖТ и требования по установке циклонных предтопков.

2. Разработанные методики исследования, расчетов конструктивно-компоновочных, расходно-термодинамических и технико-экономических параметров циклонных предтопок для работы на КЖТ, которые определяют особенности факельного сжигания КЖТ в камерных топках котлов.

3. Предложенная расчетная модель горения КЖТ в топках котлов на основе использования математических моделей CFD (Computational Fluid Dynamics), в которых сформирован алгоритм расчета.

4. Разработанные конструктивно-компоновочные параметры циклонных предтопок, защищенные Патентом РФ.

5. Разработанные параметры режимов горения КЖТ в циклонных предтопках.

**Методы исследования:** расчетно-аналитические, экспериментальные методы, методы расходного и энергетического балансов, математического моделирования.

**Практическая значимость работы.** Разработанная методика, методический подход, математическая модель и алгоритмы позволяют получать конструктивно-компоновочные параметры циклонных предтопок для сжигания КЖТ, определять влияние параметров циклонных предтопок на эффективность сжигания, устанавливать рациональный диапазон мощностей циклонных предтопок. Рассчитанные параметры циклонных предтопок для котлов могут служить информационной базой для дальнейших исследований и проработки опытно-промышленных установок.

Результаты работы **использованы** в организациях ЗАО «ЗиО-КОТЭС», ООО НПП «Росток» для проектирования энергетических установок по использованию КЖТ, исследования технологии использования КЖТ на экспериментальном стенде, разработки оборудования по применению КЖТ на ТЭС; в учебном процессе НГТУ для подготовки студентов дневной формы обучения по и магистрантов по специальности 140100 – «Теплоэнергетика и теплотехника».

**Личный вклад автора.** Автором разработана методика исследования новой технологии использования на ТЭС КЖТ, которая учитывает изменение энергии активации, особенности горения КЖТ и требования по установке циклонных предтопок; разработаны методики исследования, получены результаты расчетов конструктивно-компоновочных, расходно-термодинамических и технико-экономических параметров циклонных предтопок для работы на КЖТ; проведены экспериментальные исследования по горению КЖТ в циклонных предтопках и выполнено их сопоставление результатами численных исследований горения КЖТ; предложена расчетная модель горения КЖТ, в которой сформирован алгоритм расчета; получены результаты расчетов конструктивно-компоновочных параметров циклонных предтопок, параметры режимов горения КЖТ в циклонных предтопках и технико-экономические показатели ТЭС с новой технологией использования КЖТ.

**Достоверность** результатов и выводов диссертационной работы обосновывается использованием разработанных методик (основанных на экспериментальных данных и нормативных методах), фундаментальных закономерностей

технической термодинамики, гидрогазодинамики, теплопередачи. Математические модели и математическое моделирование базируются на методах, апробированных и хорошо себя зарекомендовавших при решении ряда других задач подобного класса.

**Апробация работы.** Основные результаты исследований докладывались на: Международном научно-техническом конгрессе «Энергетика в глобальном мире» (г. Красноярск, СФУ, 2010г.); международной конференции «I International conference thermal power and sustainable development. TENOR 2010» (Босния и Герцеговина, г.Углевик, 2010г.); Всероссийской конференции- конкурсе инновационных проектов студентов и аспирантов (г.Томск, ТПУ, 2011г.); международной конференции «Современная наука: идеи, исследования, результаты, технологии» (Украина, г.Алушта, 2011г.); международном симпозиуме «7<sup>th</sup> International Symposium on Coal Combustion» (Китай, г.Харбин, 2011г.); VIII Всероссийской конференции с международным участием «Горение твердого топлива» (г.Новосибирск, СО РАН институт Теплофизики, 2012г.); в рамках научных сессий НГТУ и расширенного семинара кафедры ТЭС НГТУ.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 10 печатных работ, из них: 2 научных статьи – в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы научные результаты на соискание ученой степени кандидата наук, 1 – патент РФ, 2 – в зарубежных сборниках научных трудов, 5 – в сборниках трудов и материалах всероссийских и международных конференций.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (из 131 наименования) и приложений. Основной текст изложен на 153 страницах, содержит 73 рисунка, 33 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель исследования, определены научная новизна и практическая ценность работы, аннотируются основные положения работы.

В **первой главе** выполнен обзор схем использования КЖТ на ТЭС, предлагается схема паротурбинного энергоблока, показана ее перспективность и технологическая готовность и обосновывается актуальность исследований предложенной схемы.

На основании проведенного анализа сформулированы **задачи исследования**:

1. Разработка методик экспериментального и численного исследования новой технологии использования на ТЭС КЖТ с учетом особенностей горения КЖТ, изменения энергии активации, требований по установке циклонных предтопков.
2. Экспериментальное исследование горения КЖТ в циклонном предтопке. Определение характерных особенностей работы ЦП, условий воспламенения КЖТ, основных влияющих параметров.

3. Разработка расчетной модели горения КЖТ в топках котлов на основе использования математических моделей CFD, формирование алгоритма расчета, математическое моделирование горения КЖТ в циклонном предтопке и топке котла, оснащенного циклонным предтопком.
4. Разработка рекомендаций по выбору конструктивно-компоновочных и расходно-термодинамических параметров циклонных предтопок.
5. Разработка параметров режимов горения КЖТ в циклонных предтопках.
6. Оценка технико-экономических показателей новой технологии использования КЖТ на ТЭС с котлоагрегатами, оснащенными ЦП.

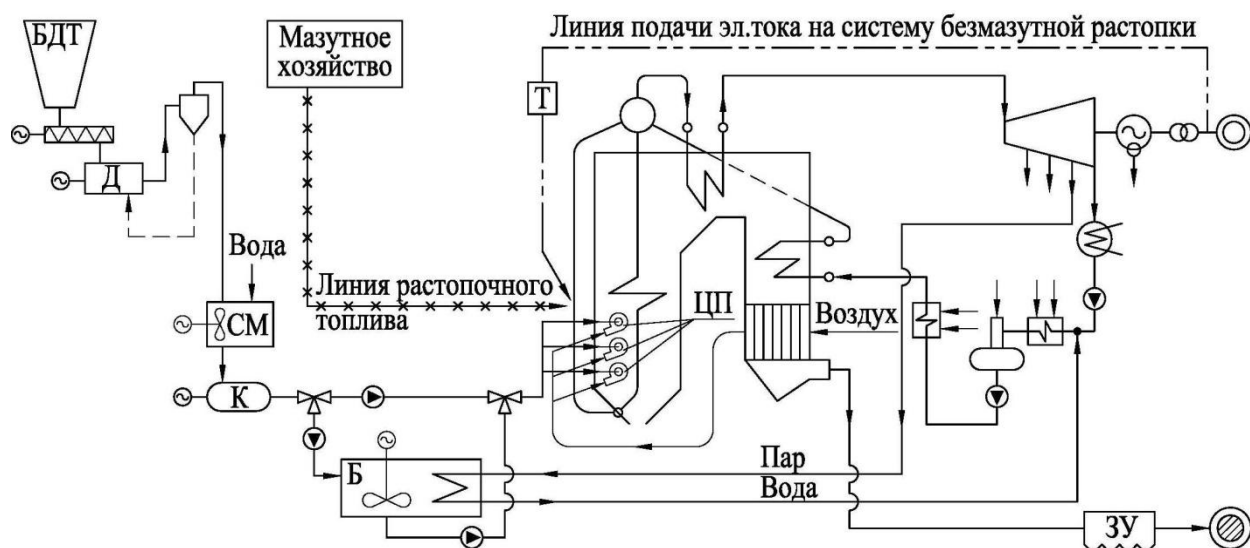


Рис. 1. Схема использования КЖТ на ТЭС: БДТ- бункер дробленого топлива; Д- дезинтегратор; СМ- смеситель; К- кавитатор; Б- бак запаса КЖТ; ЦП- циклонный предтопок, ЗУ- золоуловитель, Т- трансформатор.

Во **второй** главе изложена разработанная методика исследования технологии использования КЖТ на ТЭС.

Разработанная методика экспериментального исследования основывается на уравнениях

материального (расходного) баланса

$$B'_{КЖТ} + m_6 = B''_{КЖТ} + m_2 + m_3, \quad (1)$$

где  $B'_{КЖТ}$  – масса поступившего в ЦП КЖТ, кг;  $m_6$  – масса поступившего в ЦП воздуха, кг;  $B''_{КЖТ} = B'_{КЖТ} \cdot (q_4 / 100)$  – масса несгоревшего в ЦП КЖТ, кг, где  $q_4$  – мех. недожог КЖТ в ЦП, %;  $m_2$  – масса газов, образовавшихся при горении КЖТ, кг;  $m_3 = (B'_{КЖТ} - B''_{КЖТ}) \cdot A'_{КЖТ} / 100$  – масса образовавшейся в процессе горения КЖТ золы, кг,

энергобаланса

$$Q_p + Q_6 = Q_{m_2} + Q_3 + Q_4 + Q_5, \quad (2)$$

где  $Q_p = Q'_{i КЖТ} + h_{мл}$  – располагаемое тепло топлива, кДж/кг;  $Q_6$  – тепло вносимое в ЦП подогретым воздухом, кДж/кг;  $Q_{m_2}$  – теплота топочных газов на выходе из ЦП, кДж/кг;  $Q_3$  – тепловые потери с химическим недожогом топлива, кДж/кг;  $Q_4$  – тепловые потери с механическим недожогом топлива, кДж/кг;  $Q_5$  – тепловые потери от наружного охлаждения, кДж/кг.

Тепловой расчет котла с ЦП при работе на КЖТ может выполняться по нормативному методу ВТИ-ЭНИН. При этом расчет теплоты сгорания КЖТ с достаточной степенью точности целесообразно выполнять по теплоте сгорания исходного угля:

Низшая теплота сгорания КЖТ

$$Q_{i\text{КЖТ}}^r = Q_{i\text{уг}}^r \cdot a - R \cdot (1-a), \quad (3)$$

где  $Q_{i\text{уг}}^r$  – низшая теплота сгорания угля, кДж/кг;  $a$  – массовая доля угля в КЖТ, кг/кг;  $R=2260$  кДж/кг – теплота парообразования воды (на испарение дополнительной влаги в КЖТ относительно исходного угля).

Потери тепла  $q_3, q_4$  при сжигании КЖТ в топках котлов с ЦП следует принимать  $0 \div 0,5$  % и  $0,2 \div 1,0$  % соответственно, в зависимости от марки исходного угля.

Определяющими параметрами для схемы сжигания в котлах с ЦП являются:

тепловая мощность ЦП на поданное топливо

$$Q_{\text{ЦП}} = \frac{B_{\text{полн.}} \cdot Q_{i\text{КЖТ}}^r}{3600}, \quad (4)$$

тепловая мощность ЦП на сгоревшее топливо

$$Q_{\text{ЦП}}^{\text{сгор}} = \frac{B_{\text{полн.}} \cdot Q_{i\text{КЖТ}}^r}{3600} \cdot \left(1 - \frac{q_4^{\text{ЦП}}}{100}\right), \quad (5)$$

полезное тепловыделение в ЦП

$$Q_{\text{ЦП}} = B_{\text{полн.}} \cdot \left( Q_{i\text{КЖТ}}^r \cdot \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) + h_{\text{мл}} + Q_{\text{в}} \right) \cdot \frac{100 - q_5}{100}, \quad (6)$$

теплонпряжение объема ЦП

$$q_V = \frac{Q_{\text{ЦП}}}{V_{\text{ЦП}}}, \quad (7)$$

теплонпряжение сечения ЦП

$$q_F = \frac{Q_{\text{ЦП}}}{F_{\text{ЦП}}}, \quad (8)$$

где  $q_4^{\text{ЦП}}$  – механический недожог КЖТ в выходном сечении ЦП, %;  $V_{\text{ЦП}}$  – объем камеры сгорания ЦП, м<sup>3</sup>;  $F_{\text{ЦП}} = \pi r^2$  – площадь сечения ЦП, м<sup>2</sup>.

Экспериментальные исследования горения КЖТ в ЦП предполагает выполнение измерений (рис.2) в объеме, необходимом для сведения энергетических и материальных балансов.

Основными параметрами, сопоставляемыми с результатами численных исследований, является температура факела на выходе из ЦП и температура стенки по длине ЦП. Температура факела является показателем тепловыделения (тепловой мощности) ЦП. Погрешность определения температуры факела на выходе из ЦП соответствует погрешности измерения входных параметров: расхода, калорийности и температуры топлива, расхода и температуры воздуха.

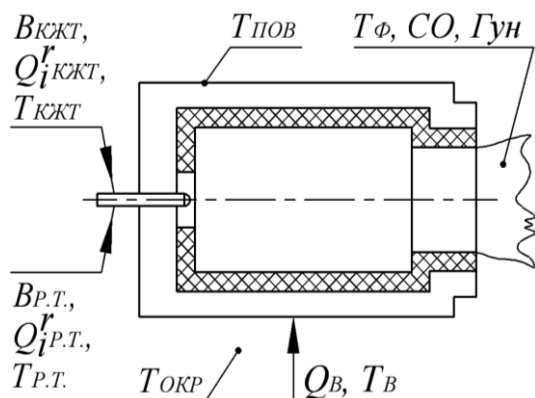


Рис. 2. Принципиальная схема измерений в ЦП при сжигании КЖТ:  $V_{KЖТ}$  - расход КЖТ,  $Q_{iKЖТ}^r$  - калорийность КЖТ,  $T_{KЖТ}$  - температура КЖТ,  $V_{P.T.}$  - расход растопочного топлива,  $Q_{iP.T.}^r$  - калорийность растопочного топлива,  $T_{P.T.}$  - температура растопочного топлива,  $T_{ОКР}$  - температура окружающего воздуха,  $T_{ПОВ}$  - температура поверхности ЦП,  $Q_B$  - расход воздуха,  $T_B$  - температура воздуха,  $T_{Ф}$  - температура факела,  $CO$  - концентрация  $CO$ ,  $\Gamma_{ун}$  - содержание горючих в уносе.

Методика численного исследования сжигания КЖТ в циклонном предтопке в CFD-программе ANSYS Fluent заключается в определении основных параметров работы предтопка: температур стенки по длине ЦП, температуры газов на выходе из ЦП, степени выгорания топлива, содержания кислорода.

Базовыми уравнениями ANSYS Fluent, по которым ведется расчет процессов, являются: уравнение неразрывности, уравнение энергии, закон сохранения импульса, уравнения переноса компонентов среды, уравнение равновесия сил для дискретной фазы и пр. Также в расчетах использованы: модель турбулентности k- $\epsilon$  (стандартного вида), P-1 модель излучения (уравнение переноса энергии излучением), диффузионно-кинетическая модель горения, модель выхода летучих веществ «The constant rate devolatilization model».

Горение дизельного (растопочного) топлива описывается соответствующей выбранному виду топлива экзотермической химической реакцией, при этом в ANSYS Fluent также принимаются энергия активации и константа скорости реакции горения. Расход дизельного топлива в численном исследовании определяется исходя из равенства тепловыделения с тепловыделением в экспериментальных исследованиях:

$$V_{P.T.}^{чис} = \frac{Q_{iP.T.экс}^r}{Q_{iP.T.чис}^r} \cdot V_{P.T.экс}^{экс}, \quad (9)$$

где  $Q_{iP.T.экс}^r$  - низшая теплота сгорания растопочного топлива в экспериментах, кДж/кг;  $Q_{iP.T.чис}^r$  - низшая теплота сгорания растопочного топлива в численных исследованиях, кДж/кг;  $V_{P.T.экс}^{экс}$  - расход растопочного топлива в экспериментах, кг/с;  $V_{P.T.чис}^{чис}$  - расход растопочного топлива в численных исследованиях, кг/с.

В базе ANSYS Fluent отсутствуют модели топлив типа КЖТ, ВУТ. При выполнении численных исследований КЖТ по типу топлив принципиально отнесено к угольным топливам. Состав КЖТ определяется в соответствии с экспериментальными и расчетными данными.

В методике численных исследований представлена предлагаемая модель КЖТ для расчетного комплекса ANSYS Fluent с учетом кинетических особенностей горения КЖТ, а также алгоритм формирования исходных данных специально для ANSYS Fluent. Исследования проводились для КЖТ из кузнечного



каменного угля марки Д. В состав КЖТ входит собственно кузнецкий каменный уголь марки Д и вода.

Определение основных теплофизических характеристик КЖТ (калорийность, плотность и пр.) требует расчета элементарного состава конечного продукта исходя из массового соотношения угля и воды.

Модель КЖТ (рис. 3) для ANSYS Fluent разработана и подобрана на основании результатов экспериментальных исследований и проверена серией расчетов. Согласно данной модели КЖТ разбивается на три составляющих, которые в расчетах поступают в расчетную область одновременно, с одних и тех же поверхностей и по одинаковым траекториям. Такое решение позволяет обеспечить параллельность протекания процессов прогрева частиц, испарения влаги, выхода летучих и горения коксового остатка, но обеспечивает забаластированность расчетной области водой и водяными парами. При этом снижается температура воспламенения топлива, что отмечалось в многочисленных исследованиях по горению ВУТ, но требуется подвод большого количества тепла на испарение влаги топлива. Кинетические параметры горения «угля» и «обводненного угля» в составе модели КЖТ задаются одинаково.

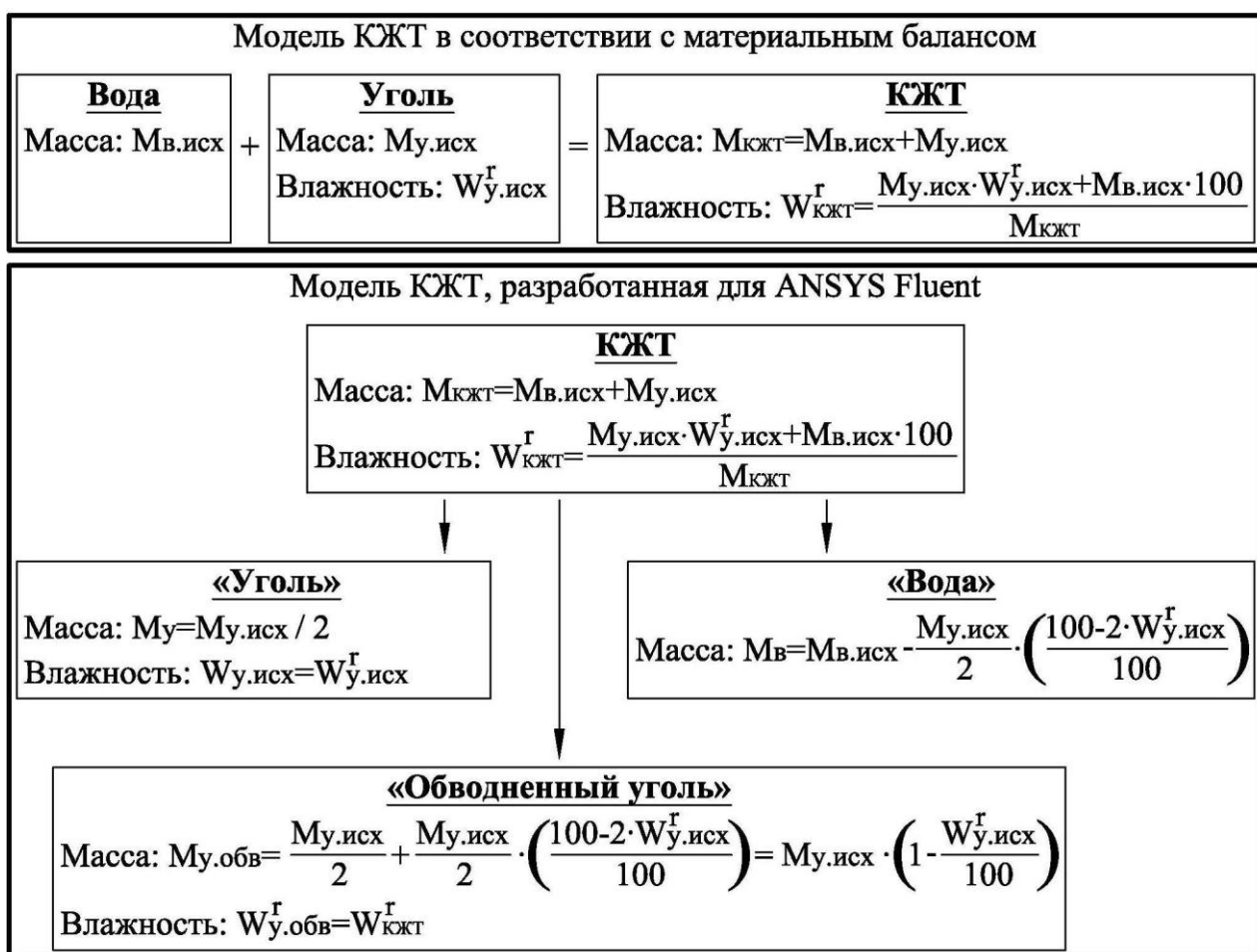


Рис. 3. Физическая модель КЖТ и модель КЖТ, разработанная для ANSYS Fluent.

При моделировании конкретной угольной частицы («Уголь» или «Обводненный уголь») в ANSYS Fluent весь процесс разбивается на следующие

стадии: прогрев частицы до начала испарения влаги из топлива; испарение влаги из топлива; выделение летучих, представленных обобщенным углеводородом вида  $CH_\alpha O_\beta N_\gamma$ , который горит согласно реакции  $CH_\alpha O_\beta N_\gamma + \lambda_{O_2} = CO + \lambda_{H_2O} \cdot H_2O + \lambda_{N_2} \cdot N_2$ , где  $\lambda_{O_2}$ ,  $\lambda_{H_2O}$ ,  $\lambda_{N_2}$  - стехиометрические коэффициенты реакции; горение коксового остатка рассчитывается по диффузионно-кинетической модели, константа скорости реакции горения коксового остатка ( $k_0$ ) определяется по экспериментальной обобщенной зависимости  $\ln k_0 = f(E_A)$ , горение углерода происходит по схеме  $C \rightarrow CO \rightarrow CO_2$ ; прогрев/охлаждение золы остатка до выхода частицы из расчетной области.

Методика оценки капиталовложений в агрегаты, технические системы и в целом в энергоблок с КЖТ включает определение капиталовложений и в собственно ЦП на основе массово-стоимостного подхода и данных заводов изготовителей.

Методика предполагает возможность сопоставления капиталовложений в энергоблоки с КЖТ и традиционные пылеугольные энергоблоки.

Удельные капиталовложения в энергоблок (не в станцию в целом, без учета изыскательных, проектных работ)

$$K_{уд\ ТП} = \frac{K_{ЭБ}}{N} = \frac{\sum K_i}{N}, \quad (10)$$

где  $K_{ЭБ} = \sum K_i$  - суммарные капиталовложения в ЭБ, \$;  $N$  - установленная мощность ЭБ, кВт.

Капиталовложения в котлоагрегат, оснащенный ЦП

$$K_{КА} = K_{КА}^0 \cdot \left( \prod_{i=1}^9 c_i \right) \cdot \left[ \prod_{j=1}^n \left( \frac{x_j}{x_j^0} \right)^{n_j} \right] + K_{ЦП}, \quad (11)$$

где  $K_{КА}^0$  - базовое значение капиталовложений в котел;  $c_i$  - коэффициенты приведения;  $x_j$  - определяющие параметры;  $x_j^0$  - базовые значения параметров;  $K_{ЦП}$  - капиталовложения в ЦП.

Капиталовложения в ЦП

$$K_{ЦП} = Q_{mm} \cdot k \cdot K_{ЦПуд}, \quad (12)$$

где  $Q_{mm}$  - тепловая мощность топки, МВт;  $k$  - доля топлива, вводимого в топку через ЦП;  $K_{ЦПуд}$  - удельные капиталовложения в ЦП, \$/МВт.

Капиталовложения в агрегаты и технические системы включают расходы на изготовление, монтаж, доставку оборудования на место строительства, а также дополнительные пропорционально отнесенные затраты в инфраструктуру ТЭС.

В **третьей главе** произведено обоснование выбора конструктивно-компоновочных и расходно-термодинамических параметров циклонного предтопка для исследований, приведено описание экспериментальной установки и ЦП (рис. 4), характеристики топлива и схема измерений (рис. 5), дана оценка погрешностей. Рассмотрено влияние геометрических характеристик циклонного предтопка на его аэродинамику, проверена и подтверждена эксперименталь-

ными данными модель КЖТ для CFD-программ. Приведены результаты расчета расходно-термодинамических и конструктивно-компоновочных параметров циклонного предтопка и их анализ. Установлены ограничения по тепловым характеристикам циклонных предтопок. Проведена оценка рациональной тепловой мощности ЦП для энергетических котлов большой и малой мощности.

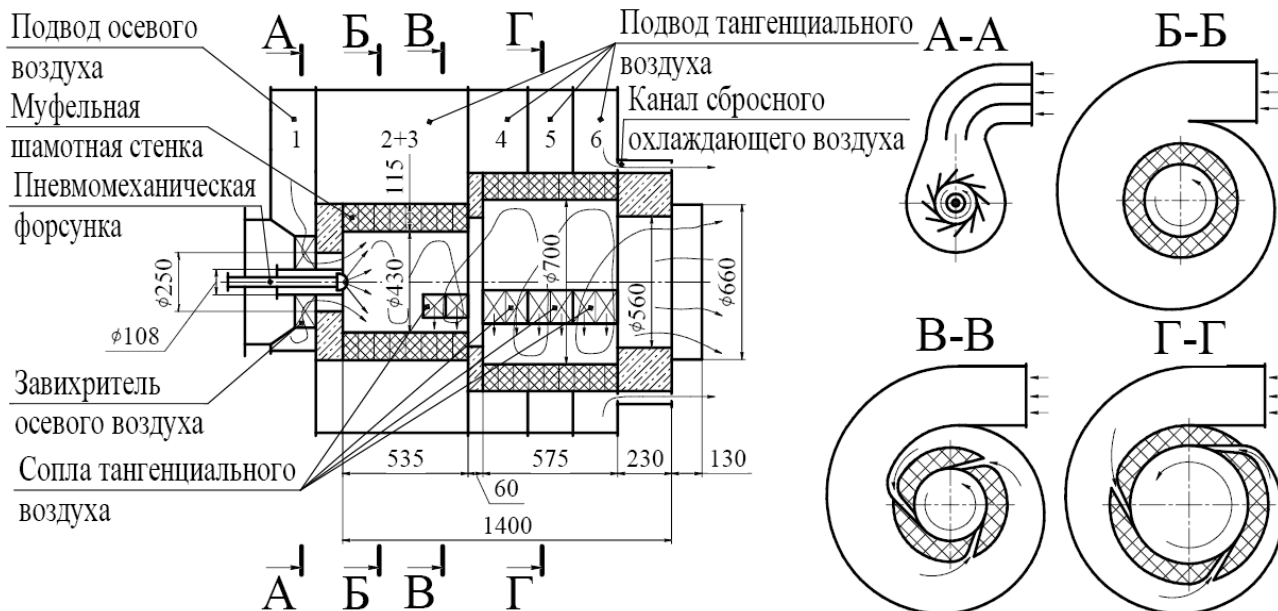


Рис. 4. Устройство циклонного предтопка.

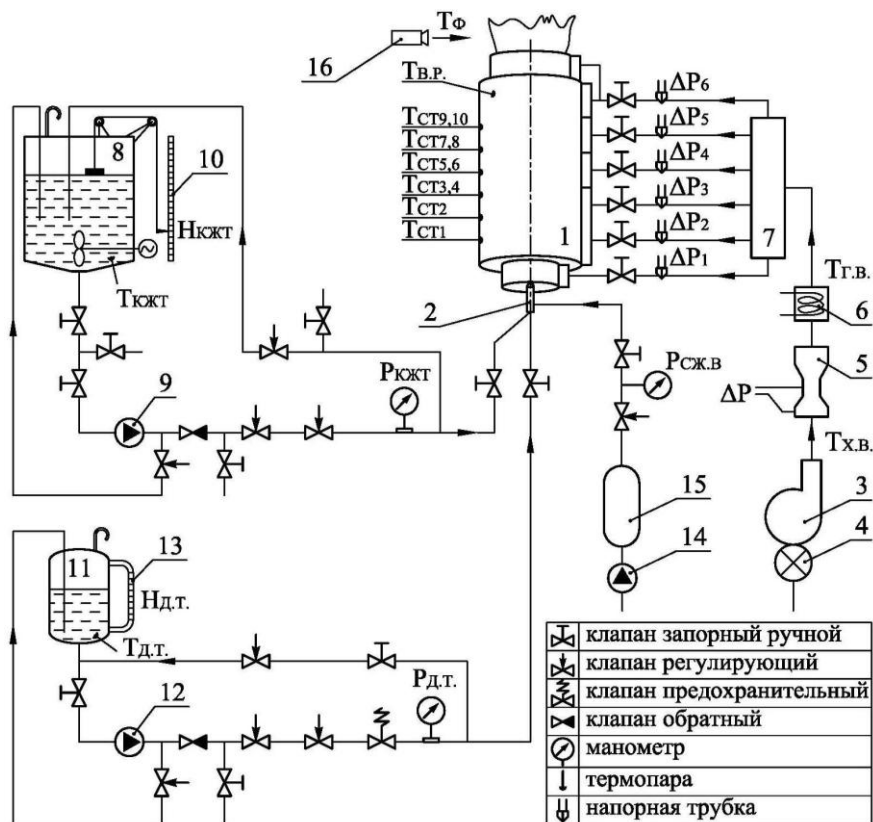


Рис. 5. Принципиальная схема измерений: 1- ЦП; 2- пневмомеханическая форсунка; 3- дутьевой вентилятор, 4- направляющий аппарат, 5- плоское расходомерное сопло, 6- электрический калорифер, 7- раздающий воздушный короб, 8- расходная емкость КЖТ, 9- насос КЖТ, 10- уровнемер КЖТ, 11- расходная емкость дизельного топлива, 12- насос дизельного топлива, 13- уровнемер дизельного топлива, 14- компрессор, 15- ресивер, 16- пирометр.

По выполненной оценке относительная погрешность аналитического расчета тепловыделения в пределах ЦП составляет ~6 %, погрешность измерения температуры на выходе из ЦП в экспериментах составляет до 114°C (~15 %), погрешность расчета температуры в численном математическом исследовании ~15% (определяется погрешностью входных параметров).

Экспериментальные исследования показали, что надежную непрерывную подачу КЖТ в ЦП с требуемым широким углом раскрытия факела из всех опробованных образцов обеспечила только пневмомеханическая форсунка.

Экспериментально подтверждена возможность организации стабильного горения КЖТ в циклонных предтопках (рис. 6 а, б), их работоспособность при высоких температурах (рис. 6 в, г) и возможность применения ЦП в качестве горелочных устройств для энергетических котлов ТЭС.

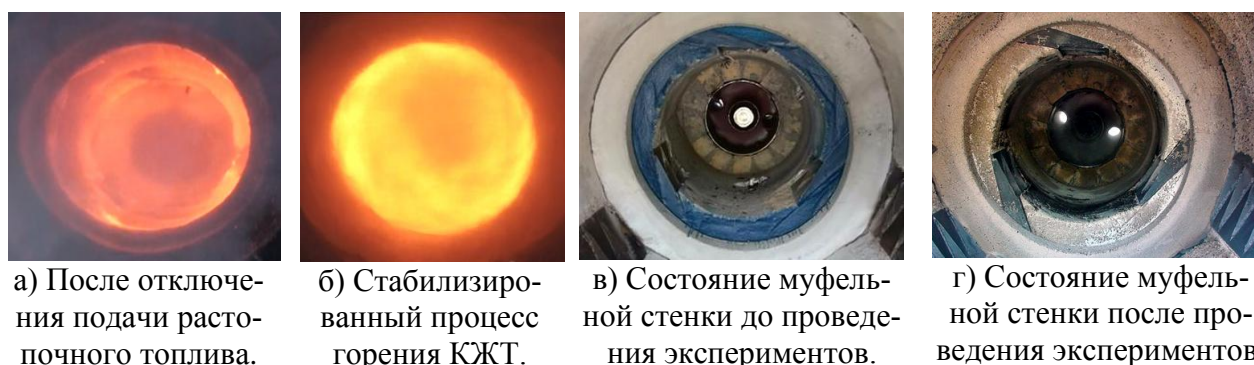


Рис. 6. Фотографии горения КЖТ и состояния футеровки.

Экспериментальные и численные исследования горения растопочного дизельного топлива (ДТ) (рис. 8-9) и КЖТ (рис. 10-13) показали их принципиальную сходимость (рис. 7 а, б). Стабильное воспламенение КЖТ обеспечивается при температуре футеровки 600÷700 °С. В проведенных огневых экспериментах отмечено формирование кольцевой структуры факела в поперечном сечении ЦП. Хорошо коррелируют абсолютные значения и распределение температур по длине ЦП, средняя температура газов на выходе из ЦП. Так, при работе на КЖТ, температура газов на выходе из ЦП составляет 1062 °С, что несколько ниже экспериментальных данных (1090÷1160 °С). Различие температур объясняется погрешностями измерений и расчетов, различными характеристиками по механическому недожогу топлива (10,4 % и 7,4 % соответственно).

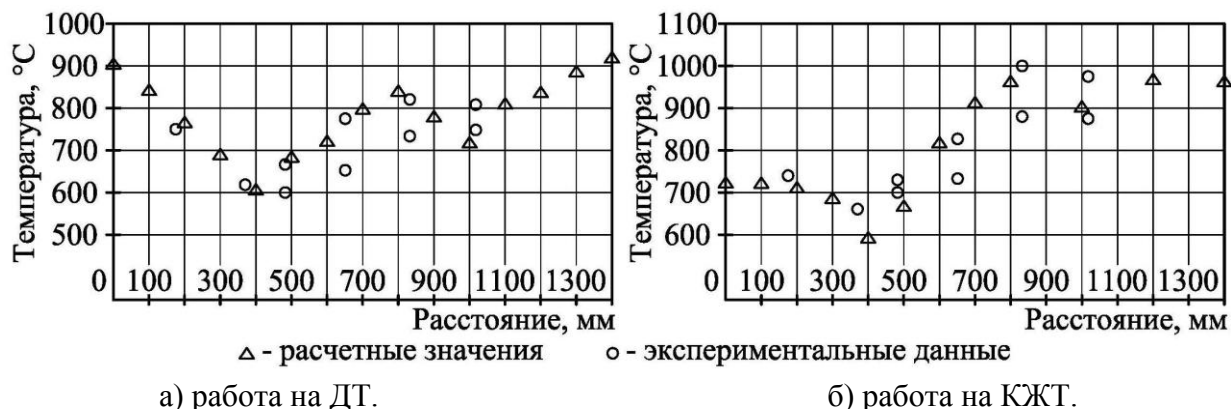


Рис. 7. Сравнение расчетных и экспериментальных температур футеровки ЦП.

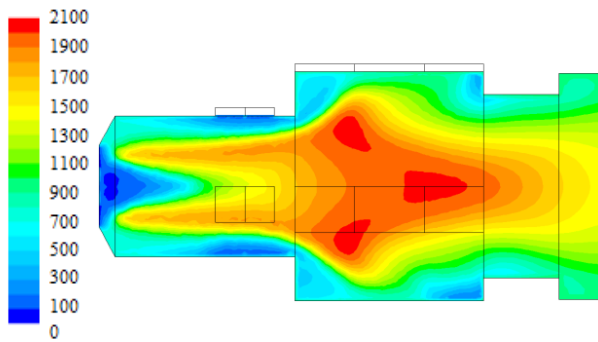


Рис. 8. Поле температур по оси ЦП (ДТ), °С.

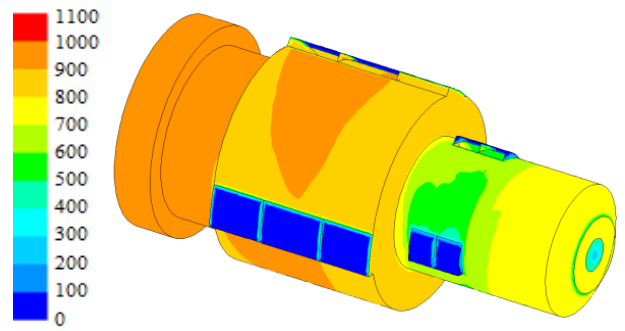


Рис. 9. Температура стенки (ДТ), °С.

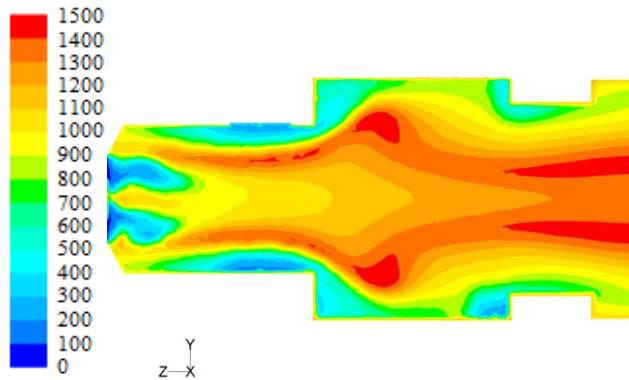


Рис. 10. Поле температур в продольном сечении по оси ЦП (КЖТ), °С.

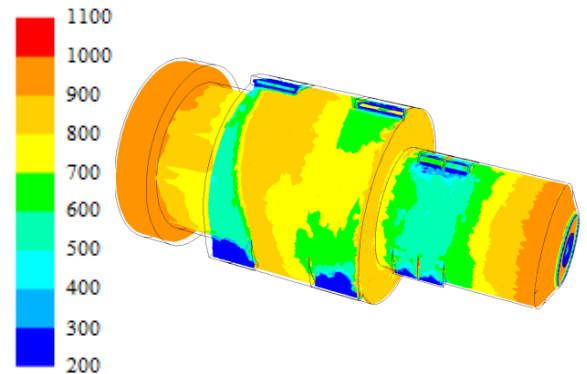


Рис. 11. Температура стенки (КЖТ), °С.

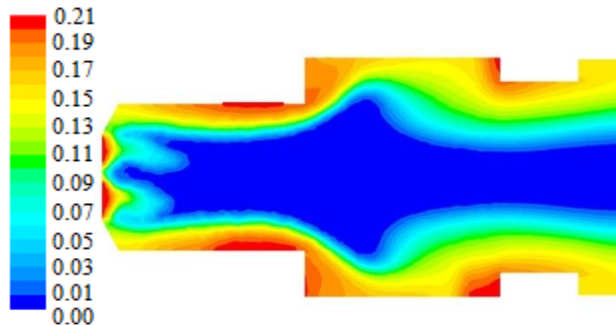


Рис. 12. Объемная доля кислорода в продольном сечении по оси ЦП (КЖТ).

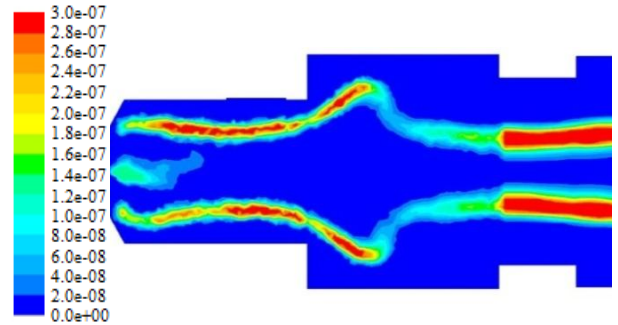


Рис. 13. Скорость горения кокса в продольном сечении по оси ЦП (КЖТ), кг/с.

Полученные результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных подтверждают адекватность предложенной модели горения КЖТ для программного комплекса ANSYS Fluent (CFD) и необходимость корректировки кинетики горения КЖТ по сравнению с константами химического реагирования исходного угля. Так, для использованного в исследованиях кузнецкого угля марки Д, при проведении расчетов для КЖТ следует уменьшать по сравнению с исходным углем параметры: температуру выхода летучих на 26-30 %, энергию активации летучих на 33-37 %, энергию активации кокса КЖТ на 10-14 %.

Выполненные многовариантные расчеты аэродинамики ЦП с различными конструктивно-компоновочными и расходно-термодинамическими параметрами показали, что для организации активной зоны рециркуляции следует в технически достижимом диапазоне повышать параметр крутки аксиального воздуха, увеличивать втулочное соотношение камеры воспламенения и кольцевого канала аксиального воздуха и увеличивать через него расход воздуха. При

соотношении диаметров камеры воспламенения и аксиального канала воздуха на уровне  $D_{фут}/d_{внеи} \approx 3 \div 3,5$  организуется зона рециркуляции. Эпюры скоростей в исходном и рекомендуемом вариантах ЦП представлены на рис. 14.

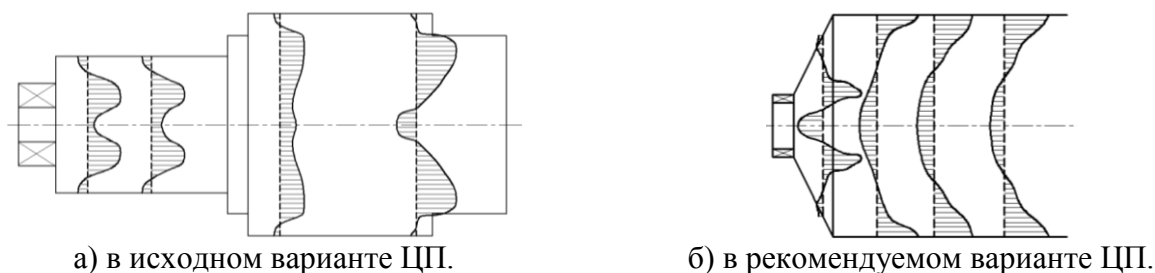


Рис. 14. Эпюры осевой составляющей скорости.

Типоразмеры ЦП зависят от общего подхода к проектированию топочно-горелочных устройств. Суммарная мощность ЦП, как и для традиционных горелок, должна быть равна тепловой мощности топки. В случае замещения циклонными предтопками только части горелок (при использовании КЖТ из высокореакционных углей) их количество и мощность предлагается подбирать таким образом, чтобы тепловыделения ЦП хватало для стабильного воспламенения КЖТ в основных горелках котла. Обобщение и анализ результатов экспериментальных и опытно-промышленных исследований по работе котлов, оснащенных муфелями, показывает, что для поддержания стабильности воспламенения угольной пыли суммарная мощность стабилизирующих (муфельных) горелок при их размещении вне основных горелок должна составлять 20÷30 % от мощности основных работающих горелок. В случае использования КЖТ из каменных углей марок Д, Г предлагается обеспечивать суммарную тепловую мощность ЦП близкой к 30% тепловой мощности основных горелок.

В табл. 1 представлены рекомендуемые мощности ЦП для котлов различной паропроизводительности при использовании КЖТ из высокореакционных углей.

Таблица 1

Рекомендуемые мощности ЦП для котлов большой мощности.

Паропроизводительность, т/ч	160	220	320	420	500	670	820
Тепловая мощность топки, МВт	124	168	235	310	370	500	600
Тепловая мощность вихревых горелок, МВт	25-35	25-35	35-50	35-50	35-50	35-50	35-50
Тепловая мощность прямоточных горелок, МВт	35	25	25-35	25-35	35-50	50-75	35-50
Диапазон тепловых мощностей горелок, МВт	25-35	25-35	25-50	25-50	35-50	35-75	35-50
Рекомендуемая тепловая мощность ЦП ( $0,3 \cdot Q_{осн.гор}$ ), МВт	7,5-10,5	7,5-10,5	7,5-15	7,5-15	10,5-15	10,5-21	10,5-21

Проверка разработанных на основе экспериментальных и численных исследований конструктивно-компоновочных и расходно-термодинамических параметров ЦП выполнена для ЦП тепловой мощностью 12 МВт (рис. 15) при его совместной работе с серийным котлом ДКВр-20-13.



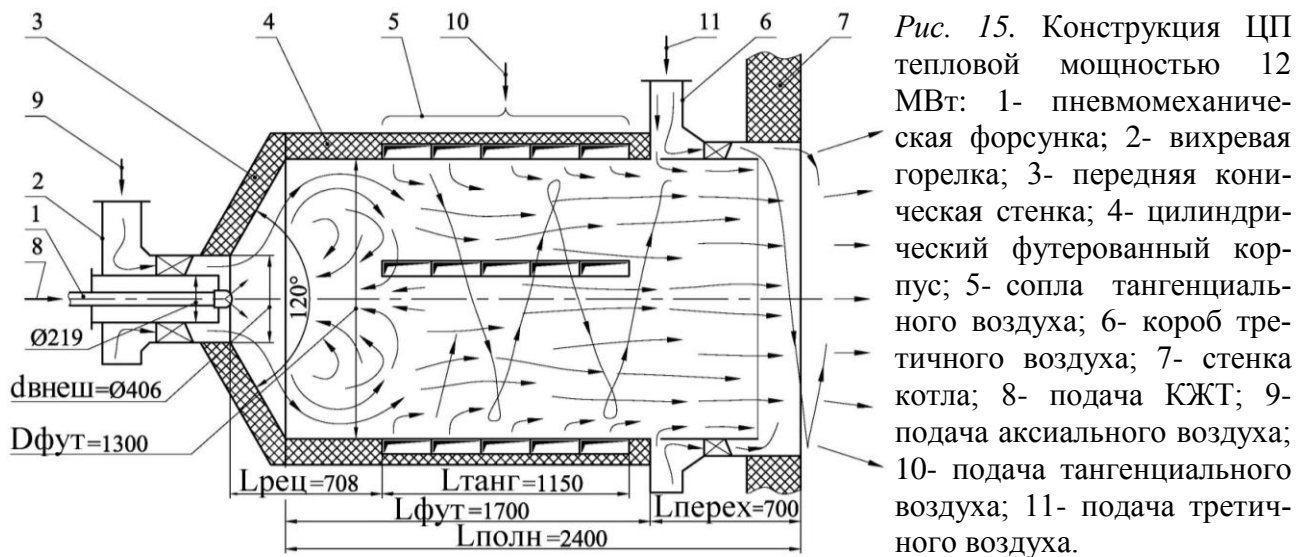


Рис. 15. Конструкция ЦП тепловой мощностью 12 МВт: 1- пневмомеханическая форсунка; 2- вихревая горелка; 3- передняя коническая стенка; 4- цилиндрический футерованный корпус; 5- сопла тангенциального воздуха; 6- короб третичного воздуха; 7- стенка котла; 8- подача КЖТ; 9- подача аксиального воздуха; 10- подача тангенциального воздуха; 11- подача третичного воздуха.

Результаты расчетов в ANSYS Fluent (рис. 16, 17) показывают высокую степень выгорания КЖТ в пределах ЦП ( $\approx 60\%$ ), что обеспечивает достаточное тепловыделение для поддержания стабильности горения КЖТ. В топочную камеру поступают газы с высокой температурой, где остатки несгоревшего топлива при подаче дополнительного воздуха эффективно сжигаются в высокотурбулизированном потоке. Недожог топлива в пределах топочной камеры не превышает  $1\div 2\%$ . Принятые для расчета значения коэффициента теплоотдачи и степени черноты для радиационных поверхностей нагрева, и величины теплоотдачи для конвективных поверхностей нагрева подтверждаются тепловыми расчетами по программе BoilerDesigner. Разность значения температуры на выходе из топки составляет  $13\text{ }^\circ\text{C}$  ( $\delta=1,1\%$ ), температуры за кипяtilьным пучком-  $2\text{ }^\circ\text{C}$  ( $\delta=0,5\%$ ), при этом величина механического недожога топлива различается на  $\Delta q_4=0,8\%$ , а степень выгорания ( $1-q_4$ ) различается на  $\delta\approx 0,8\%$ .

При полученном  $60\%$  -ном выгорании КЖТ в пределах ЦП температурный уровень внутри ЦП позволяет работать в режиме твердого шлакоудаления, что предпочтительно как для существующих, так и для новых котлов.

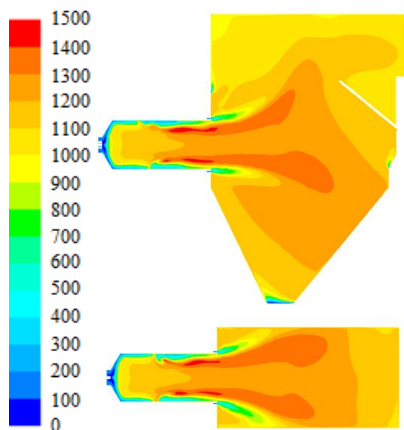


Рис. 16. Поля температур по оси ЦП,  $^\circ\text{C}$ .

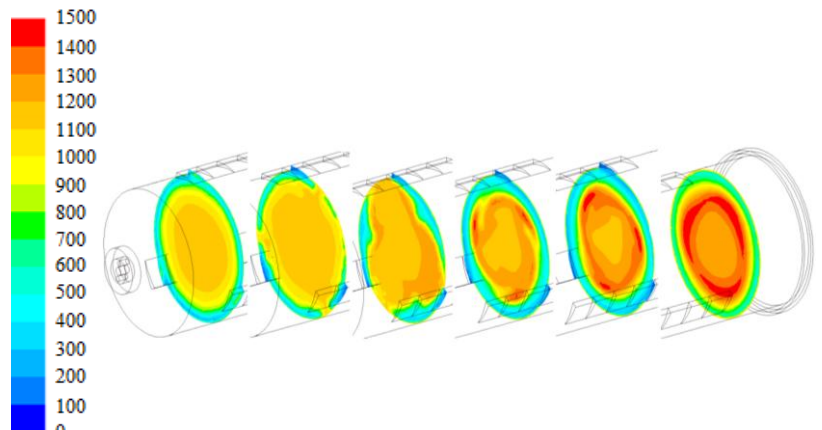


Рис. 17. Поля температур в поперечных сечениях ЦП,  $^\circ\text{C}$ .

Выполненная на основе многовариантных расчетов рационализация ЦП совместно с результатами экспериментальных исследований позволила определить следующие параметры и зависимости:

- Рекомендуемое теплонапряжение объема ЦП:  $q_{V.\partial on}=3,7\pm 0,22$  МВт/м<sup>3</sup>;
- Рекомендуемое теплонапряжение сечения ЦП:  $q_{F.\partial on}=9,0\pm 0,54$  МВт/м<sup>2</sup>;
- Объем ЦП:  $V_{\text{ЦП}}=(0,27\pm 0,13)\cdot Q_{\text{ЦП}}$ ;
- Диаметр ЦП:
  - по теплонапряжению объема:  $D_{\text{ЦП}}^V=(0,912\pm 0,045)\cdot\sqrt[3]{V_{\text{ЦП}}}$ ; (13)
  - по теплонапряжению сечения:  $D_{\text{ЦП}}^F=(0,376\pm 0,012)\cdot\sqrt{Q_{\text{ЦП}}}$ ; (14)
- Длина ЦП:  $L=(1,7\pm 0,25)\cdot D_{\text{ЦП}}$ ; (15)
- Внешний диаметр аксиального завихрителя:  $d_{\text{акс}}=(0,32\pm 0,02)\cdot D_{\text{ЦП}}$ . (16)

Диаметр ЦП мощностью до 12 МВт рекомендуется определять на основе теплонапряжения объема, свыше 12 МВт - по теплонапряжению сечения.

В четвертой главе приведены результаты оценки капиталовложений в агрегаты, технические системы и в целом в энергоблок с новой технологией использования КЖТ. Капиталовложения в агрегаты и технические системы включают расходы на изготовление, монтаж, доставку оборудования на место строительства, а также дополнительные пропорционально отнесенные затраты в инфраструктуру ТЭС.

Технико-экономические показатели новой технологии использования КЖТ на ТЭС сопоставлены с показателями аналогичных энергоблоков, работающих по традиционной технологии пылеугольного сжигания. В настоящее время предпочтение часто отдается развитию распределенных систем, которые оснащаются энергоблоками относительно небольшой мощности, поэтому оценка технико-экономических показателей выполнена для блоков малой и средней мощности с котлами производительностью от 75 до 670 т/ч.

Ввиду использования в России угля в промышленно-развитых регионах и, соответственно, сложной экологической обстановки в возможных местах строительства ТЭС для обоих рассматриваемых вариантов предполагается применение комплекса природоохранных систем. При использовании КЖТ выбросы оксидов азота (NO<sub>x</sub>) обеспечиваются на уровне существенно меньшем нормативных значений, поэтому в данном варианте в качестве природоохранных систем используются только установки по улавливанию выбросов золовых частиц и оксидов серы.

Удельные капитальные затраты на ЦП приняты исходя из массово-стоимостных показателей заводов-изготовителей и данных проектных организаций на уровне 3500 долл/МВт тепловой мощности ЦП на поданное топливо. Общий уровень капиталовложений в ЦП зависит от тепловой мощности топки котлоагрегата (КА). Удельные капиталовложения в ЦП практически не зависят от мощности энергоблока и составляют 2,1...5,4% от капиталовложений в КА.

На рис. 18, 19 представлены удельные капиталовложения в котлоагрегат, топливоподачу и топливоприготовление, природоохранные системы (капиталовложения в эти системы и агрегаты зависят от вида топлива и технологии его использования) для энергоблоков с КЖТ и традиционных пылеугольных энергоблоков.



Удельные капиталовложения в КА с ЦП для работы на КЖТ с увеличением мощности с 52 до 115 МВт практически не изменяются ( $\approx 425$  долл/кВт), а со 115 до 220 МВт плавно снижаются с 425 до 375 долл/кВт. Капиталовложения в котлоагрегат энергоблока 12 МВт составляют 310 долл/кВт и обусловлены низкими параметрами пара (более дешевыми сталями, меньшей толщиной стенки и, соответственно, меньшей массой поверхностей нагрева).

Суммарные удельные капиталовложения в КА, топливоподачу и топливоприготовление, природоохранные системы для энергоблоков 12...220 МВт на КЖТ с увеличением мощности снижаются с 715 до 554 долл/кВт. Удельные капиталовложения в аналогичное оборудование для традиционной пылеугольной ТЭС находятся в диапазоне 922...737 долл/кВт, что на 29-33% больше, чем для энергоблоков с КА с ЦП для работы на КЖТ.

Меньшие капиталовложения в КА в схеме с КЖТ обусловлены меньшей стоимостью мельничного оборудования и смежных систем в котельном отделении, более плотными шагами труб поверхностей нагрева и меньшими массово-габаритными и стоимостными характеристиками собственно котла, более дешевыми сталями пароперегревателя (из-за меньшей температуры горения).

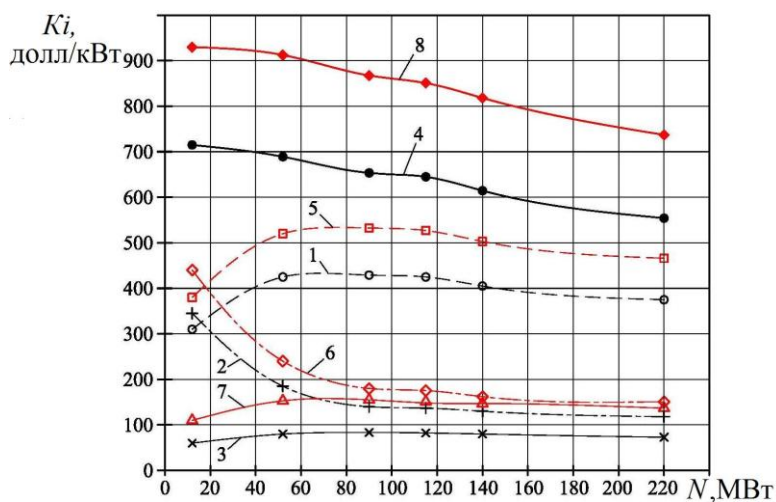


Рис. 18. Удельные капиталовложения  $K_i$  в котлоагрегат, топливоподачу и топливоприготовление, природоохранные системы: для ТЭС с КЖТ и ЦП: 1 – КА, 2 – топливоподача и топливоприготовление, 3 – природоохранные системы, 4 – суммарные капиталовложения в три агрегата; для традиционной пылеугольной ТЭС: 5 – КА, 6 – топливоподача и топливоприготовление, 7 – природоохранные системы, 8 – суммарные капиталовложения в три агрегата.

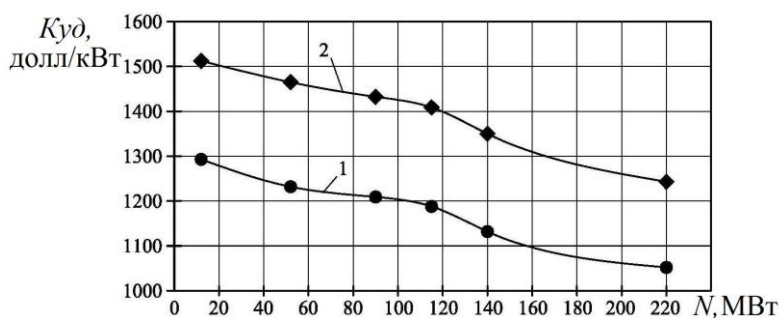


Рис. 19. Зависимость удельных капиталовложений в энергоблок  $K_{уд}$  от отпускаемой мощности  $N$ : 1 – ТЭС с КЖТ, 2 – традиционная пылеугольная ТЭС.

Удельные капиталовложения в ЭБ с КА с ЦП для работы на КЖТ лежат в диапазоне от 1294 до 1052 долл/кВт, что ниже капиталовложений в традиционные пылеугольные энергоблоки (1512...1243 долл/кВт). Большую долю капиталовложений в ЭБ составляют капиталовложения в котлоагрегат и турбоагрегат, причем для ЭБ высокого давления доля котлоагрегата остается практически неизменной и составляет  $\approx 35\%$ , а доля турбоагрегата возрастает с 15 до

24%, при этом с учетом низкопотенциальной группы (включающей систему регенерации) доля турбогруппы составляет 23...33 %.

Удельные капиталовложения в природоохранные системы для ЭБ с КА с ЦП для работы на КЖТ составляют 61...85 долл/кВт или 5...7% от суммарных капиталовложений, а для традиционных пылеугольных энергоблоков 109...156 долл/кВт или 7...11% от суммарных капиталовложений.

Капиталовложения в энергоблок с котлоагрегатом с ЦП для работы на КЖТ (не во всю станцию, без учета изыскательных и проектных работ) для мощностей 12...220 МВт лежат в диапазоне от 1293 до 1052 долл/кВт и в среднем на 15 % ниже капиталовложений в традиционные пылеугольные энергоблоки (1512...1243 долл/кВт). Снижение величины общих капиталовложений в энергоблок с КЖТ относительно традиционных пылеугольных энергоблоков обусловлено снижением капиталовложений в КА (на 19 %), систему топливоподачи и топливоприготовления (на 22%), природоохранные системы (на 45%).

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложена новая технологии использования на ТЭС кавитационного жидкоугольного топлива.
2. Разработана методика экспериментального исследования горения КЖТ в ЦП, учитывающая особенности конструктивных и термодинамических параметров ЦП. Разработана методика оценки погрешностей измерений в экспериментальных исследованиях применительно к экспериментальному стенду.
3. Выполнено экспериментальное исследование горения КЖТ в циклонном предтопке с определением характерных особенностей работы ЦП, условий воспламенения КЖТ, основных влияющих параметров. Показано, что исследованная конструкция ЦП позволяет организовать надежное горение КЖТ, которое стабильно даже при температуре воздуха  $t_g=30$  °С.
4. Разработана методика численного исследования, анализа показателей тепловой экономичности, расчета конструктивно-компоновочных параметров с учетом изменения энергии активации, особенности горения КЖТ и требования по установке циклонных предтопков.
5. Разработана расчетная модель горения КЖТ в топках котлов на основе использования математических моделей CFD, в которой сформирован алгоритм расчета и модель формирования исходных данных КЖТ, выполнено математическое моделирование горения КЖТ в циклонном предтопке и топке котла, оснащенного циклонным предтопком.
6. Предложена методика анализа результатов численного исследования по принципу сопоставления с экспериментальными исследованиями и выполнено сопоставление результатов.
7. Развита методика оценки технико-экономических показателей новой технологии использования на ТЭС КЖТ с котлоагрегатами, оснащенными ЦП.
8. Разработаны конструктивно-компоновочные параметры циклонных предтопков, защищенные Патентом РФ.

9. Выполнены многовариантные расчеты горения КЖТ в циклонных предтопках и показано:

- Температура стенки (футеровки) ЦП, необходимая для воспламенения КЖТ составляет 600-700°C;
- Рациональный температурный режим ЦП по условиям стабильного воспламенения и отсутствия шлакования при использовании КЖТ из углей марок Д, Г составляет: ядро факела- 900÷1200 °С; температура в пристенной области- до 1000 °С; температура на выходе из ЦП- 900÷1150 °С.
- Рекомендованное теплонапряжение объема ЦП:  $q_{v.don}=3,7\pm 0,22$  МВт/м<sup>3</sup>;
- Рекомендованное теплонапряжение сечения ЦП:  $q_{F.don}=9,0\pm 0,54$  МВт/м<sup>2</sup>;
- Объем ЦП:  $V_{ЦП}=(0,27\pm 0,13)\cdot Q_{ЦП}$ ;
- Диаметр ЦП мощностью до 12 МВт рекомендуется определять по формуле:  $D_{ЦП}=(0,912\pm 0,045)\cdot \sqrt[3]{V_{ЦП}}$ , свыше 12 МВт:  $D_{ЦП}=(0,376\pm 0,012)\cdot \sqrt{Q_{ЦП}}$ ;
- Длина ЦП:  $L=(1,7\pm 0,25)\cdot D_{ЦП}$ ;
- Внешний диаметр аксиального завихрителя:  $d_{акс}=(0,32\pm 0,02)\cdot D_{ЦП}$ , при этом рекомендуется иметь  $D_{ЦП}\leq 600$  мм;
- Температуру выхода летучих, энергию активации летучих и кокса КЖТ из каменных углей марки Д в расчетах следует уменьшать по сравнению с исходным углем на 26-30 %, 33-37 % и 10-14 % соответственно.

10. Рекомендованная суммарная мощность ЦП для котлов большой мощности (до 820 т/ч), работающих на каменных углях марки Д, Г, составляет 30 % от мощности основных горелок. Для котлов малой мощности эта величина составляет 60÷80 %. В соответствии с номенклатурой выпускаемых котлов и особенностями ЦП, наиболее рационально применять ЦП с тепловыми мощностями 7,5÷21 МВт.

11. Капиталовложения в энергоблок с котлоагрегатом с ЦП для работы на КЖТ (не во всю станцию, без учета изыскательных и проектных работ) для мощностей 12...220 МВт лежат в диапазоне от 1293 до 1052 долл/кВт и в среднем на 15 % ниже капиталовложений в традиционные пылеугольные энергоблоки (1512...1243 долл/кВт). Удельные капиталовложения в ЦП практически не зависят от мощности энергоблока, составляют 2,1...5,4 % от капиталовложений в КА и оцениваются в 3500 \$/МВт тепловой мощности ЦП. Снижение величины общих капиталовложений в энергоблок с КЖТ относительно традиционных пылеугольных энергоблоков обусловлено снижением капиталовложений в КА (на 19 %), систему топливоподачи и топливоприготовления (на 22%), природоохранные системы (на 45%).

**Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:**

*Публикации в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы научные результаты на соискание ученой степени кандидата наук*

1. Цепенюк, А.И. Исследование процессов горения искусственного композитного жидкого топлива в циклонном предтопке / А.И. Цепенюк, Ю.В. Овчинников, Ю.В. Стрижко и др. // Энергетик. 2011.– № 7.– с. 45-47.

2. Цепенюк, А.И. Исследование воспламеняемости твердых топлив и ИКЖТ / Ю.В. Овчинников, А.И. Цепенюк, А.В. Шихотинов и др. // Доклады АН ВШ РФ. 2011. – № 1(16). – с. 117-126.

*Отраслевые издания, патенты и материалы конференций*

3. Цепенюк, А.И. Исследование процессов горения ИКЖТ (искусственного композитного жидкого топлива) в циклонном предтопке / А.И. Цепенюк, Ю.В. Овчинников, Ю.В. Стрижко // Сборник тезисов докладов первого международного научно-технического «Энергетика в глобальном мире»: Красноярск, Июнь 16-18. – 2010. – с. 370-371.

4. Цепенюк, А.И. Приготовление и сжигание водоугольного топлива в различных топочных устройствах / А.И. Цепенюк, С.В. Луценко, Ф.А. Серант и др. // Proceedings 11th International Conference Thermal Power and Sustainable Development (TENOR 2010): Ugljevik, Republic of Bosnia and Herzegovina, November 21-23. – 2010. – P. 61-68.

5. Tsepenuk, A.I. Preparation of Coal-Water Slurry and power units for its combustion / A.I. Tsepenuk, S.V. Lutsenko, Yu.V. Ovchinnikov, F.A. Serant // TERMOtehnika - Scientific and technical journal of the Society of thermal engineers of Serbia: Belgrade, Serbia. - 2011. - P. 169 - 181. [Приготовление водоугольной суспензии и энергетические установки для ее сжигания]

6. Цепенюк, А.И. Стенд для экспериментального исследования сжигания ИКЖТ в топочно-горелочных устройствах и исследование сжигания топлива / А.В. Шихотинов, Ю.В. Овчинников, А.И. Цепенюк // XVII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии» / Сборник трудов в 3-х томах. Т.3. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – с. 285-286.

7. Цепенюк, А.И. Приготовление водоугольного топлива и технологии его сжигания / Ф.А. Серант, А.И. Цепенюк, Ю.В. Овчинников и др. // Международная конференция «Современная наука: идеи, исследования, результаты, технологии». Сборник научных статей №1 (6): Алушта, Украина, Июнь 02-06. – 2011. – с. 95-101.

8. Tsepenuk, A.I. Calculating analysis of firing different composition artificial coal liquid fuels (ACLF) in the cyclone primary furnace / A.I. Tsepenuk, Yu.V. Ovchinnikov, F.A. Serant // Proceedings 7th International Symposium on Coal Combustion: Harbin, China, July 17-20. – 2011. – p. 507-511. [Расчетные исследования по сжиганию искусственных композиционных жидких топлив (ИКЖТ) различного состава в циклонном предтопке]

9. Цепенюк, А.И. Растопочная угольная горелка : пат. 2466331 Рос. Федерация : МПК F23D1/02, F23Q13/00, F23D14/12 / А.И. Цепенюк, Ф.А. Серант, А.Р. Квривишвили; патентообладатель ЗАО «ЗиО-КОТЭС» – № 2011143344/06; заявл. 26.10.11; опубл. 10.11.12.

10. Цепенюк, А.И. Численные исследования сжигания композитного водоугольного топлива в котле типа ДКВр-20-13 / А.И. Цепенюк, Ю.В. Овчинников, С.В. Луценко и др. // VIII Всероссийская конференция с международным участием «Горение твердого топлива» / Сборник трудов: Новосибирск, Ноябрь 12-16. – 2012. – с. 102.1-102.9.

Отпечатано в типографии Новосибирского  
Государственного технического университета  
630073, г.Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Тел./факс (383) 346-08-57  
Формат 60 x 84/16. Объем 1.5 п.л. Тираж 100 экз.  
Заказ 1414. Подписано в печать 31.10.2013 г.