



На правах рукописи

**Косова Ольга Юрьевна**

**РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВКИ  
ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  
ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ**

Специальность 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Саратов – 2008

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Саратовский государственный  
технический университет»

Научный руководитель: – доктор технических наук, профессор  
**Симонов Вениамин Федорович**

Официальные оппоненты: – доктор технических наук, профессор  
**Беляев Альберт Александрович**  
– кандидат технических наук, доцент  
**Коваль Александр Андреевич**

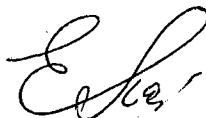
Ведущая организация: – ГОУ ВПО «Саратовский государственный  
университет им. Н.Г. Чернышевского»

Защита состоится «29» января 2009 г. в 14 часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.242.07 при ГОУ ВПО «Саратовский  
государственный технический университет» по адресу: 410054, г. Саратов,  
ул. Политехническая, 77, ауд. 159.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической  
библиотеке ГОУ ВПО «Саратовский государственный технический  
университет».

Автореферат разослан 26 декабря 2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Е.А. Ларин

*Посвящается памяти  
основателя саратовской школы  
по переработке горючих сланцев  
профессора Каширского Владимира Григорьевича*

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** По имеющимся оценкам, геологические запасы нефти и газа составляют лишь около 10% общих ресурсов органического топлива в мире, а на долю угля, сланцев и торфа приходится примерно 90%. По запасам твердого топлива Россия занимает ведущее место в мире. В частности, запасы горючих сланцев только в Волжском бассейне составляют около 30 млрд. т. Горючие сланцы относятся к низкосортным твердым топливам. Сжигание их в топках теплотехнологических агрегатов весьма затруднительно и вызывает недопустимо большие выбросы в окружающую среду загрязняющих веществ.

Эффективное использование низкосортного твердого топлива возможно на основе технологий, предусматривающих комплексную его переработку. Теоретические основы комплексного энерготехнологического топливоиспользования были заложены в трудах наших соотечественников А.Б. Чернышева, З.Ф. Чуханова, В.А. Голубцова, Л.И. Хитрина и многих других. Большой вклад в разработку проблемы внесен школой, созданной профессором В.Г. Каширским в Саратовском государственном техническом университете.

В настоящее время комплексное использование твердого топлива рассматривается по меньшей мере в трех аспектах: во-первых, использование не только теплового потенциала для получения энергии, но и содержащихся в топливе ресурсов для производства химических продуктов, строительных материалов и т.д.; во-вторых, максимально возможное и целесообразное на данном этапе развития техники использование теплоты сгорания топлива или продуктов его переработки; в-третьих, предельное снижение всякого рода выбросов (в том числе и тепловых), загрязняющих окружающую среду. Технологии комплексного использования дают возможность крупномасштабного вовлечения низкосортного твердого топлива в промышленность страны.

В основе комплексного энерготехнологического использования твердого топлива лежат высокотемпературные термохимические процессы пиролиза и газификации. Применяемые для осуществления этих процессов реакторные устройства с плотным и кипящим слоями частиц топлива несовершенны и не обеспечивают требования современной технологии пирогазификации. Перспективными являются проточные трубчатые

реакторы для переработки топлива в пылевидном состоянии. Для их широкого использования необходимо располагать методами расчета теплогидравлических характеристик, которые бы учитывали наличие химических реакций в потоке топливной газозвеси, переменность свойств потока и другие специфические особенности термодеструктивных превращений исходного топливного вещества в проточном реакторе. Данное обстоятельство определило выбор предмета исследования диссертационной работы, а именно процессов в трубчатых реакторах, которые обладают целым рядом достоинств и могут рассматриваться как одно из возможных решений для новой энергетической техники.

**Целью работы** является разработка установки и методик расчета основных ее элементов- проточных трубчатых реакторов типа «газовзвесь» для термической обработки горючих сланцев в пылевидном состоянии.

**Основными задачами исследования** являются:

- разработка установки с трубчатыми реакторами для термической обработки горючих сланцев;
- разработка методики расчета характеристик течения потока топливной газозвеси на адиабатическом разгонном и основном участках трубчатого реактора;
- уточнение эмпирических связей и математической модели для описания теплообмена стенки реактора с потоком химически реагирующей газозвеси;
- получение корреляционных связей для технологических и энергетических показателей термоокислительного пиролиза сернистых сланцев;
- разработка алгоритма и программы комплексного расчета трубчатых реакторов для переработки сланцев;
- разработка методики расчета закалочных трубчатых устройств;
- оптимизация конструктивных и режимных характеристик реакторов- пирогазификаторов и закалочных устройств.

**Научную новизну диссертации** составляют следующие результаты, выносимые на защиту:

- новая установка для термической обработки горючих сланцев в проточных трубчатых реакторах типа «газовзвесь»;
- алгоритмы расчета характеристик течения адиабатического разгонного участка и основного участка проточного трубчатого реактора типа «газовзвесь»;
- алгоритм численного расчета теплообмена при течении в трубе потока газозвеси с химически разлагающимися твердыми частицами;
- корреляционные связи и соотношения между параметрами термоокислительного пиролиза сернистых сланцев;
- алгоритм комплексного расчета трубчатых реакторов-пирогазификаторов; результаты расчетов;

- алгоритм расчета трубчатого закалочного устройства типа «газовзвесь»;

- рекомендации по выбору оптимальных характеристик реакторов- пирогазификаторов и закалочных устройств.

**Практическая ценность результатов работы** заключается в разработке новой установки с трубчатыми реакторами, в создании расчетно-методических основ проектирования трубчатых реакторов, применение которых позволяет решать актуальные задачи эффективного использования низкосортного твердого топлива и создавать новую энергетическую технику.

Для всех разработанных расчетных алгоритмов составлены программы расчетов на ЭВМ.

Получен патент ФГУ ФИПС на изобретение № 2315910 «Установка для термической обработки измельченного твердого топлива». Основными элементами установки являются трубчатые реакторы.

Результаты исследования использованы в учебном процессе кафедры «Промышленная теплотехника» СГТУ.

**На защиту выносятся:** схема установки для термической обработки горючих сланцев в пылевидном состоянии; математические модели теплогидравлических процессов в трубчатых реакторах-пирогазификаторах и закалочных трубчатых устройствах; эмпирические корреляции для основных характеристик термоокислительного пиролиза сернистых сланцев; методики расчета реакторных устройств; результаты расчетов; рекомендации по выбору конструктивных и режимных характеристик реакторных устройств.

**Достоверность результатов и выводов** обеспечивается применением фундаментальных законов термодинамики, гидрогазодинамики, теплопередачи, использованием в математических моделях апробированных параметрических связей, проверкой разработанных расчетных методик на адекватность путем сравнения данных расчета с опытными данными разных авторов.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на научных конференциях и семинарах Саратовского государственного технического университета (2000+2008 гг.); на Второй Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, октябрь 1998 г.); на II Международной научно-технической конференции «Повышение эффективности теплообменных процессов и систем» (Вологда, апрель 2000 г.); на IV Минском Международном форуме по теплообмену (Минск, май 2000 г.); на Всероссийской научной конференции «Тепло- и массообмен в химической технологии» (Казань, сентябрь 2000 г.); на XIII школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Физические основы экспериментального и математического моделирования процессов газодинамики и теплообмена в

энергетических установках» (Санкт-Петербург, май 2001 г.); на 2-й Всероссийской научно-технической конференции «Прогрессивные процессы и оборудование металлургического производства» (Череповец, май 2001 г.); на Четвертой Международной теплофизической школе «Теплофизические измерения в начале XXI века» (Тамбов, сентябрь 2001 г.); на Международной конференции «Технические, экономические и экологические проблемы энергосбережения» (Саратов, октябрь 2001 г.); на Третьей Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, октябрь 2002 г.); на XIV школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках» (Рыбинск, май 2003 г.); на V Минском Международном форуме по тепло- и массообмену (Минск, май 2004 г.); на Международной научной конференции «Горючие сланцы – альтернативный источник топлива и сырья. Фундаментальные исследования. Опыт и перспективы» (Саратов, май 2007 г.); на XVI школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках» (Санкт-Петербург, май 2007 г.); на VI Минском Международном форуме по тепло- и массообмену (Минск, май 2008 г.); на Третьей Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ-2008 (Москва, сентябрь 2008 г.).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 17 печатных работ, в том числе 2 статьи в журнале, рекомендованном ВАК, и 15 статей в сборниках научных трудов и материалов конференций. Имеется патент на изобретение.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка использованной литературы и приложений. Основная часть изложена на 137 страницах, содержит 37 рисунков и 6 таблиц. Список использованной литературы включает 131 наименование, в том числе 14 иностранных источников.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дано обоснование актуальности темы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** «Использование горючих сланцев и установка для их термической обработки» на основании анализа опубликованных данных сформулированы основные современные мировые тенденции развития энергетики: изменение структуры топливно-энергетического баланса в сторону большего использования твердого топлива; наряду с централизованным производством энергоносителей (крупная станционная

энергетика) активно развиваются системы распределенной генерации энергии (завод, поселок, жилой дом и т.д.); развитие газогенераторных технологий для ПГУ, ДВС, ГТУ, ТЭ, экологически чистых и с конкурентоспособными показателями.

В США, Европе, Японии выполняются крупные межнациональные и национальные программы по внедрению экологически чистых технологий энергетического использования твердого топлива.

В России развитие этих технологий запланировано в материалах Энергетической стратегии, экологической программы РАО «ЕЭС России» на период до 2010 года, «Программы обновления основного оборудования ТЭС РАО «ЕЭС России» на период до 2010 года» (техническое перевооружение энергоблоков КЭС и ТЭЦ аппаратами с газификацией твердого топлива различными способами), концепции программы «Энергоэффективная экономика» на 2007-2010 годы и на перспективу до 2015 года.

Исключительно важной экономической задачей является вовлечение в топливно-энергетический баланс страны больших запасов низкосортного твердого топлива. Для Поволжского региона – это, прежде всего, горючие сланцы, отличающиеся повышенным содержанием серы. Научной школой проф. В.Г. Каширского разработаны технологии комплексного энерготехнологического использования волжских горючих сланцев, головными процессами в которых являются пиролиз или газификация. Технологии обеспечивают получение из сланца наряду с вторичными энергоносителями (газ, кокс) целого ряда ценных и уникальных по своим свойствам продуктов и полупродуктов различного целевого назначения.

В настоящее время проблема комплексного энерготехнологического использования топлива – это, главным образом, проблема аппаратного оформления головных процессов пиролиза и газификации. Реакторные устройства для осуществления данных процессов должны обеспечивать высокотемпературный нагрев топлива со скоростью  $10^3 \div 10^4$  К/с за время не более  $1 \div 10^{-1}$  с. Регулирование названных параметров позволяет управлять процессом пирогазификации. Важной операцией в технологии пирогазификации твердого топлива является закалка удаляемой из реактора парогазовой смеси. Закалка позволяет оптимизировать состав смеси и способствует повышению выхода целевых продуктов.

Выполненный в работе анализ показал, что наилучшим образом реализовать требования технологии пирогазификации удастся при использовании проточных трубчатых реакторов типа «газовзвесь». Большое их преимущество состоит в возможности передавать топливному потоку тепло от внешнего источника через стенку реактора. Высокая интенсивность теплообмена газозвеси со стенкой способствует передаче тепла в количестве, необходимом для покрытия тепловых эффектов сильно эндотермических химических превращений в потоке.

Обеспечение теплотой зоны разложения топлива – это одна из основных технологических и проектных задач. В известных устройствах, где потребляемое в процессе тепло получают за счет окисления части перерабатываемого топлива, получаемые паргазовые продукты разбавлены продуктами горения (дымовой газ). В трубчатых реакторах такое разбавление может отсутствовать. Концентрация целевых компонентов в продуктах пирогазификации максимальна, что облегчает и удешевляет последующее их разделение в соответствии с технологией.

Предложено схемное решение установки, основным элементом которой являются трубчатые реакторы. Установка признана изобретением (рис. 1).

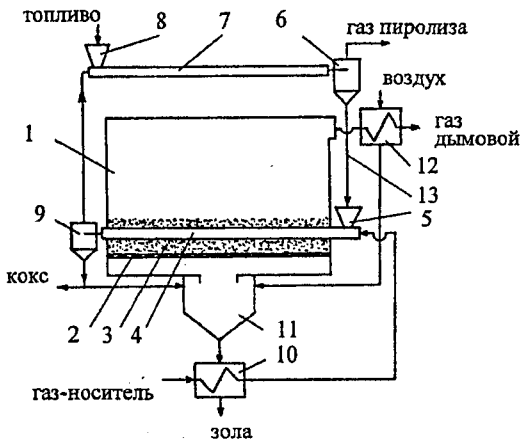


Рис. 1. Схема установки:

- 1 - корпус;
- 2 - решетка газораспределительная;
- 3 - кипящий слой;
- 4 - трубчатые реакторы;
- 5,8 - питатели-дозаторы;
- 6,9 - сепараторы;
- 7 - теплообменник закалочный;
- 10 - теплообменник зольный;
- 11 - топка технологическая;
- 12 - теплообменник «газ – воздух»;
- 13 - стояк

Важной научной задачей является разработка методик расчета основных характеристик трубчатых реакторов-пирогазификаторов пылевидного твердого топлива и закалки получаемых газов.

Во второй главе «Расчет характеристик течения и теплообмена в трубчатых реакторах» дан краткий анализ изученности течения потоков газа со взвешенными твердыми частицами в трубах. При физически многообразном взаимодействии компонентов между собой и с ограничивающими стенками канала кинематическая структура потока газозвеси является трудно идентифицируемой. Показано, что в горизонтальных трубах высокая степень симметричности профилей истинной концентрации частиц и скоростей фаз потока обеспечивается при среднерасходной скорости газа

$$w \geq [0,15gD\rho_r(K/\xi_r)^{0,5}/\rho]^{0,5}, \quad (1)$$



где  $g$  – ускорение в поле тяжести;  $D$  – диаметр трубы;  $\rho_T$  и  $\rho$  – плотности частиц и газа;  $K$  – расходная массовая концентрация частиц;  $\xi_T$  – коэффициент гидродинамического сопротивления частицы.

Рабочая скорость газа должна выбираться с учетом взвешивания частиц при минимальной температуре неізотермического потока. Для условий течения топливных газозвесей (скорость взвешивания минимальная рабочая скорость) предложено определять по модифицированной нами формуле Зуева\*

$$w_{\text{вз}} = 0,83v_v \left[ \frac{0,65f^{0,5}}{d_3^{1/7}} + \frac{19}{v_v} (KD)^{0,2} \right], \quad (2)$$

где  $v_v$  – скорость витания частиц;  $f$  – коэффициент трения твердых частиц о сталь, равен  $0,7 \div 0,9$ ;  $d_3$  – эквивалентный размер твердых частиц.

Для фактора скоростного скольжения частиц в неізотермическом потоке газозвеси рекомендована эмпирическая формула

$$\varphi_v = \frac{u}{w} = \left[ 1 + c^* \left( \frac{\rho_T}{\rho} - 1 \right)^{2/3} \left( \frac{d_T}{D} \right)^{2/3} \left( 1 + \frac{200}{Fr - Fr_{\text{кр}}} \right) \right]^{-1}, \quad (3)$$

где  $d_T$  – размер частиц;  $Fr$  и  $Fr_{\text{кр}}$  – числа Фруда, определенные по среднерасходной скорости  $w$  газа и скорости взвешивания  $w_{\text{вз}}$ ;  $c^*$  – опытный коэффициент, для топливных горизонтальных потоков  $c^* = 0,0565 - 0,003 K$ .

Гидравлическое сопротивление потока газозвеси при разложении частиц и перераспределении фаз по длине потока в соответствии с принципом наложения потерь

$$\Delta p_{\Pi} = \Delta p + \Delta p_{\Pi,T} + \Delta p_p + \Delta p_y + \Delta p_{y,T}, \quad (4)$$

где слагаемые в правой части обусловлены затратами энергии на преодоление сил вязкого трения газа –  $\Delta p$ , ударным взаимодействием твердых частиц со стенкой трубы –  $\Delta p_{\Pi,T}$ , разгоном частиц на начальном участке потока –  $\Delta p_p$ , ускорением газа –  $\Delta p_y$  и частиц –  $\Delta p_{y,T}$  при течении с теплообменом.

В диссертации даны рекомендации по расчету составляющих  $\Delta p_{\Pi}$  величин.

Разработаны алгоритмы и программы расчета характеристик течения топливной газозвеси на адиабатическом разгонном и основном участках реактора-пирогазификатора. Выполненные расчеты и анализ их результатов позволили выявить ряд особенностей течения в рассмотренных условиях и сформулировать рекомендации по

---

\* Зуев Ф.Г. Пневматическое транспортирование на зерноперерабатывающих предприятиях. М.: Колос, 1976.

конструктивному исполнению реакторов. Неизотермический поток имеет значительно более высокое гидравлическое сопротивление, чем изотермический. При расходных концентрациях частиц  $K = 3-5$  доля затрат энергии на ускорение частиц в потоке с теплообменом составляет около 30% в общей потере давления. Наибольший вклад в общую потерю давления  $\Delta p_{\Pi}$  вносит составляющая  $\Delta p_{\Pi, T}$ .

Расчет по разработанным алгоритмам скоростей частиц золы и графита в потоке воздуха для условий непосредственных их измерений в известных из литературы работах показал на вполне удовлетворительное согласие расчетных и опытных данных.

Далее обсуждается состояние вопроса о теплообмене потоков газозвеси в трубах. Отмечаются сложность и многофакторность механизма процесса, большие трудности изучения теплопереноса, прямо связанные с отсутствием надежных способов идентификации структуры течения. Наличие твердых частиц в потоке газа при определенных условиях интенсифицирует теплообмен. При высоких концентрациях частиц коэффициент теплообмена может возрасти на порядок величины. Эндотермические химические реакции в газозвеси дополнительно способствуют увеличению количества тепла, передаваемого от стенки в поток.

В работе приводится концепция автора, объясняющая механизм переноса тепла в газозвеси. На основании результатов опытов по изучению теплообмена газозвеси, выполненных на кафедре «Промышленная теплотехника» СГТУ, получено обобщенное уравнение подобия

$$Nu_{\Pi} = 0,515(1 + 0,3K) \left( \frac{c_T}{c_P} \right) \left( \frac{D}{x} \right)^{0,89} Re^{0,526(x/D)^{0,981}} \quad (5)$$

и для относительного теплообмена

$$\left. \frac{Nu_{\Pi}}{Nu} \right|_{Re=idem} = (2,5 + 0,01 \frac{x}{D})(1 + 0,3K) \left( \frac{c_T}{c_P} \right) Re^{-0,16}, \quad (6)$$

где  $Nu$  – число Нуссельта чистого газа без частиц определено, как и  $Nu_{\Pi}$  газозвеси, при температуре  $t_{CT}$  стенки, а коэффициент теплообмена отнесен к начальной разности температур  $\Delta t_0 = t_{CT} - t_0$ ;  $c_P$  и  $c_T$  – теплоемкость газа и частиц;  $x$  – длина теплообменного участка;  $Re$  – число Рейнольдса газа при  $t_{CT}$ . Определяющим размером в (5) и (6) является диаметр  $D$  трубы.

Уравнение подобия (5) описывает теплообмен как инертного, так и химически реагирующего потоков газозвеси. В последнем случае коэффициент теплообмена определяется выражением

$$\alpha_{n,p} = \frac{c_{n,CT} Q}{\pi D x (I_{n,CT} - I_{n,0})}, \quad (7)$$

где  $Q$  – передаваемая тепловая мощность;  $I_{п,ст} = c_{п,ст}'' t_{ст} + Q_p / [G(1 + K)]$  – полная энтальпия потока при выходе из трубы;  $I_{п,0} = c_{п,0}' t_0$  – то же при входе;  $c_{п,ст}''$  – удельная теплоемкость потока, вычисляется по правилу аддитивности для компонентов потока на выходе из трубы при температуре стенки;  $c_{п,0}'$  – то же для компонентов потока на входе при начальной температуре;  $G$  – расход газовой фазы;  $Q_p$  – тепловой эффект реакций разложения топлива.

Эмпирические уравнения подобия и выражения (5) и (6), в частности, по сути своей являются ограниченными. Для расширения расчетных возможностей в диссертации получил развитие численный метод расчета теплообмена потока газозвеси, основы которого даны в работе\*. Внесенные дополнения и уточнения в физико-математическую модель теплообмена и расчетную схему позволили снять некоторые ограничения, повысить универсальность метода и его эффективность.

На базе численного метода разработан алгоритм расчета теплообмена потока газозвеси в трубчатом реакторе. Алгоритм программно реализован и апробирован путем сравнения результатов расчета с опытными данными для инертной и химически реагирующей газозвеси. Получено хорошее соответствие данных при тепловых граничных условиях  $t_{ст} = \text{const}$  и  $q_{ст} = \text{const}$ , что позволяет рекомендовать разработанный расчетный алгоритм, с учетом его относительной простоты, для использования в инженерных задачах.

В третьей главе «Комплексный расчет трубчатых реакторов в составе установки для термоокислительного пиролиза сернистых сланцев» выполнен анализ процессов и получены параметрические связи для системы «трубчатые реакторы – кипящий слой» установки на рис. 1.

В рамках поставленных в диссертации задач, с использованием полученных на кафедре «Промышленная теплотехника» СГТУ опытных данных по термоокислительному пиролизу в среде воздуха пылевидных сернистых кашпирских сланцев (в сухой массе – 58,25% золы; 13,29% карбонатов; 28,47% керогена) при температурах процесса  $t_{п} = 600 \div 750^\circ\text{C}$  установлены следующие корреляционные связи:

для скорости реакций

$$\frac{dc}{d\tau} = 0,81 \cdot 10^{15} c^{-0,78} \exp\left[-(1554560 - 2738T + 1,47T^2)/(R_m T)\right]; \quad (8)$$

для теплоты, выделяющейся в реакциях

$$q_p = 1634 g_i^{0,968}, \text{ кДж/кг сух.сл.}; \quad (9)$$

\* ЖПХ, 1989, № 11, С. 2490-2496.

для подводимого через стенку реактора тепла (из теплового баланса реактора)

$$\tilde{q} = 1,65 g_s t_{\Pi} + 1,3 g_K t_{\Pi} - 1,1 t_{T,0} - g_s t_{z,0} - q_P, \text{ кДж/кг сух. сл.}, \quad (10)$$

где  $c = (g_z - g_s) / g_{opz}$  – условная концентрация получаемого газа;  $\tau$  – время, с;  $T$  – абсолютная температура процесса, К;  $R_M = 8,314$  Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная;  $g_z$  – выход газа пиролиза, кг/кг сух. сл.;  $g_K$  – выход кокса, кг/кг сух. сл.;  $g_{opz}$  – содержание керогена в исходном сланце, кг/кг сух. сл.;  $g_s$  – удельный расход воздуха, кг/кг сух. сл.;  $t_{\Pi}$  – конечная температура пиролиза, °С;  $t_{T,0}$  и  $t_{z,0}$  – начальные температуры сланца и воздуха, °С.

На основании балансовых связей и с учетом рекомендованных в диссертации значений рабочих параметров установки, для удельной площади сечения кипящего слоя получено (м<sup>2</sup>·с/кг сух. сл.)

$$f_{K,CL} = 5,22 \cdot 10^{-9} \tilde{q} (1050 - t_{K,CL})^{-1} (18 + 5,5 \cdot 10^6 d_{T,K,CL}^{1,5}) d_{T,K,CL}^{-2}, \quad (11)$$

для отношения удельной площади поверхности теплообмена реакторных труб  $f$ , м<sup>2</sup>·с/кг сух. сл., размещенных в кипящем слое, к величине  $f_{K,CL}$  –

$$f / f_{K,CL} = 4,455 \cdot 10^9 d_{T,K,CL}^{2,36} (1050 - t_{K,CL}) / [(t_{K,CL} - t_{CT})(18 + 5,5 \cdot 10^6 d_{T,K,CL}^{1,5})], \quad (12)$$

где  $d_{T,K,CL}$  – размер твердых частиц в кипящем слое, рекомендован 6 мм;  $t_{K,CL}$  и  $t_{CT}$  – температуры кипящего слоя и стенки реакторных труб, °С.

Реакторные трубы размещаются в кипящем слое с шагом  $S_1 = 3D$  в горизонтальном ряду и  $S_2 = 0,866S_1$  между рядами по высоте.

Далее в главе дается описание разработанного алгоритма комплексного расчета трубчатых реакторов установки, который предусматривает определение технологических, теплогидравлических и конструктивных характеристик с использованием вышеназванных методик, установленных параметрических связей, численного метода расчета теплообмена потока газозвеси с химическими реакциями. Алгоритм является итерационным по нескольким параметрам, он представлен в диссертации в виде блок-схемы и программно реализован.

По разработанному алгоритму выполнены многочисленные расчеты, результаты которых в работе обсуждаются. Некоторые характерные расчетные данные приведены на рис. 2.

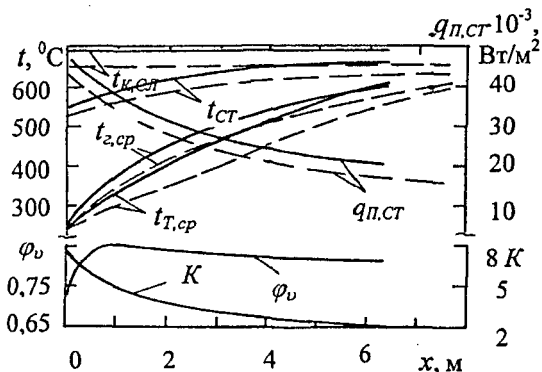
Показано, что  $g_{K,ТОП} < g_K$ , то есть процесс пиролиза сланца по тепловой энергии является независимым от дополнительного энергоисточника.

Параметры одного из вариантов исполнения установки следующие. Размещающая  $N = 315$  реакторных труб диаметром  $D = 0,04$  м и общей площадью поверхности теплопередачи  $F = 306$  м<sup>2</sup> в кипящем слое с поперечным сечением 7,7х1 м и высотой 3,5 м, при расходе воздуха  $V_s = 150$  л/кг сух. сл. и температуре процесса пиролиза  $t_{\Pi} = 600$ °С, установка, потребляя 69,2 т/ч (1660 т/сутки) сланца, будет производить пиролизный

газ в количестве  $G_2 = 664$  т/сутки и кокса (за вычетом подаваемого в топку)  $G_K = 1080$  т/сутки. Передаваемая от кипящего слоя тепловая мощность равна 7,5 МВт, а полная тепловая мощность с учетом теплового эффекта реакций пиролиза составит 14,1 МВт.

В диссертации выполнено сравнение показателей трубчатых реакторов и реакторов для газификации топлива других известных типов (Лурги, Винклера, Копперс-Тотцека, УТТ-3000). Получено, что такие удельные показатели, как расходы перерабатываемого топлива на единицу объема реактора и интенсивность процесса по газу на единицу

Рис. 2. Распределение локальных значений плотности теплового потока  $q_{п.ст}$  на стенке и осредненных в сечении параметров потока по длине реактора:  $D = 0,02$  м;  $d_T = 150$  мкм;  $g_s = 0,13$  кг/кг сух. сл.;  $t_0 = 232^\circ\text{C}$ ;  $Q = 7916$  Вт;  $Q_F = 4661$  Вт; сплошные линии – реагирующий поток; штриховые – химически инертный поток



площади поперечного сечения реактора, для трубчатых реакторов на один – два порядка величины выше, чем у сравниваемых известных устройств.

В четвертой главе «Расчет закалочного устройства» рассмотрены горизонтально ориентированные трубчатые элементы закалочного теплообменника (поз. 7 на рис.1), где в поток горячих газов пиролиза подаются холодные частицы исходного, подвергаемого термической обработке, топлива. Закалочное устройство при этом несет дополнительные функции теплоутилизатора, возвращая тепло газа с нагретыми топливными частицами в реактор-пирогазификатор.

При разработке методики расчета закалочного трубчатого реактора ставилась задача определения его длины при заданной конечной разности осредненных в сечении потока газозвеси температур газа и частиц. Для термически тонких пылевидных частиц топлива и адиабатного потока газозвеси тепловой расчет закалочного устройства сводится к решению задачи межфазного теплообмена. Разработанный алгоритм предусматривает поинтервальный расчет, позволяющий учесть переменность свойств сложных по составу газов и особенности изменения температуры влажных частиц топлива при их высушивании в потоке.

Выполненные по разработанному алгоритму и программе расчеты позволили выявить особенности процесса закалки и сформулировать ряд практических рекомендаций. Получено, что интенсивное тепловое

взаимодействие между газом и частицами осуществляется на относительно коротком входном участке трубы, составляющем около 0,1 м. На последующем участке межфазный теплообмен значительно менее интенсивен.

Проанализировано влияние начальной влажности топлива, его концентрации в потоке, скорости газа на длину закалочной трубы и уровень температур потока на выходе. Показано, что для рассматриваемых условий закалочное устройство можно отнести к категории балансовых теплообменников. Оно эффективно выполняет функции закалки газов, за доли секунды снижая их температуру.

В пятой главе «Вопросы оптимизации и экономические показатели» решен ряд задач по определению преимущественных режимных и конструктивных параметров трубчатых реакторов-пирогазификаторов и закалочных устройств.

В качестве критерия оптимальности при определении значений параметров реакторов-пирогазификаторов использовалась переменная часть годовых расчетных затрат

$$Z = (C_m M_m + C_n W_n) [p_a (1 - \gamma_n) + p_{ин}] + C_{э} W_n \tau (1 - \gamma_n), \quad (13)$$

где  $C_m$  – цена материала и монтажа реактора, руб./кг;  $M_m$  – масса материала, кг;  $C_n$  – цена единицы установленной мощности нагнетателя с учетом стоимости монтажа, руб./кВт;  $W_n$  – мощность нагнетателя, кВт;  $p_{ин}$  – коэффициент эффективности инвестиций, обусловленный условиями получения инвестиций и рыночными факторами, 1/год;  $p_a$  – коэффициент, учитывающий амортизационные отчисления, расходы на ремонт и содержание оборудования, 1/год;  $\gamma_n$  – коэффициент, зависящий от уровня налогов в федеральный и местный бюджеты;  $\tau$  – число часов работы в год;  $C_{э}$  – затраты на электроэнергию, руб./кВт.ч.

Оптимальные значения скорости газа  $w_0$  на входе в реактор,  $D$  и  $K$  находились путем перебора вариантов и сравнения их по величине годовых расчетных затрат, отнесенных к годовой производительности реактора по перерабатываемому сланцу.

Получено, что оптимальная скорость  $w_0$  несущего газа, а, следовательно, и расход газа возрастают при снижении концентрации  $K$  частиц в потоке. Скорость взвешивания  $w_{вз}$ , наоборот, увеличивается. При проектировании нужно принимать  $w_0 = w_{вз}$ .

Влияние расходной концентрации частиц на величину удельных расчетных затрат является малозначимым в области  $K \geq 3$  и оно зависит от диаметра реактора. При  $D \leq 0,03$  м экономически выгоднее область  $K \geq 3$ , а при  $D \geq 0,05$  м –  $K \cong 2 \div 5$ .

Рост диаметра реактора снижает экономические показатели. Значительно более выгодными являются трубы – реакторы малого диаметра. Минимальный их диаметр может ограничиваться техническими

или иными соображениями и возможным числом параллельно работающих труб в реакторном модуле.

Выполнены сравнительные оценки затрат на преодоление гидравлических сопротивлений известных реакторов с кипящим слоем и трубчатых типа «газовзвесь». Показано, что данные затраты для реакторов с кипящим слоем значительно выше.

Для закалочных устройств в качестве критерия оптимальности использован энергетический коэффициент

$$E = Q/\Delta p_n, \quad (14)$$

который характеризует теплогидродинамическое совершенство организации процесса теплообмена. Получено, что энергетический коэффициент  $E$  тем выше, чем меньше скорость газа  $w$ , концентрация  $K$  частиц и их размер  $d_T$  и чем больше  $D$ . По результатам анализа даны рекомендации по выбору рабочих значений данных параметров.

## ВЫВОДЫ

1. Показано, что требования современных технологий пирогазификации твердого топлива наиболее успешно можно реализовать при использовании проточных трубчатых реакторов типа «газовзвесь», главным преимуществом которых является возможность подвода большого количества тепла от внешнего источника через стенку в реакционную зону. Предложено схемное решение установки для термической переработки пылевидного сланца в трубчатых реакторах, защищенное патентом на изобретение. Разработано математическое описание теплогидравлических процессов и технологических показателей в проточных трубчатых реакторах применительно к условиям пирогазификации сланца в потоке газозвеси.
2. Разработаны алгоритмы расчета характеристик течения газозвеси на адиабатическом разгонном участке и на последующем за ним основном теплообменном участке реактора-пирогазификатора. По результатам выполненных расчетов сформулированы рекомендации по конструктивному исполнению участков реактора.
3. Проведен анализ имеющихся опытных данных по теплообмену потока газозвеси с химически инертными и разлагающимися частицами твердой фазы в трубе, на основании которого получено обобщенное уравнение подобия теплообмена. Установлено, что при длине трубы до 200-300 диаметров стабилизации теплообмена температурно-неравновесной газозвеси не достигается. Относительная интенсивность теплообмена газозвеси увеличивается по длине трубы. Учет данных выявленных особенностей позволил объяснить расхождения имеющихся в литературе опытных данных разных авторов по теплообмену газозвеси.

4. Дополнена и уточнена физико-математическая модель теплообмена потока газозвеси, на основе которой разработан алгоритм численного расчета с широкими возможностями по учету влияющих факторов в условиях термохимических превращений твердой и газовой фаз потока. Адекватность разработанного алгоритма подтверждена соответствием полученных расчетных и известных экспериментальных данных разных авторов при их сравнении.

5. Разработан алгоритм комплексного расчета трубчатых реакторов для термоокислительного пиролиза сернистых сланцев, который включает в себя в качестве составных частей предложенные в работе методики расчета гидравлических и теплообменных характеристик потока газозвеси, а также полученные автором на основании известных опытных данных корреляции для технологических и энергетических параметров процесса пиролиза сланцев. Проведено сравнение показателей предложенных трубчатых и других, освоенных промышленностью, типов реакторов для термической обработки твердого топлива. Установлено, что по ряду основных показателей трубчатые реакторы имеют значительные преимущества. К этим показателям относятся: удельный расход перерабатываемого топлива на  $1 \text{ м}^3$  объема реактора, выход получаемых газов пиролиза в расчете на  $1 \text{ м}^2$  площади поперечного сечения реактора, значения которых на 1-2 порядка выше.

6. Разработан алгоритм расчета трубчатых реакторов для закалки газов пиролиза, которую предложено осуществлять путем взаимодействия с частицами исходного топлива, подаваемого на переработку. Предложенная расчетная методика учитывает переменность свойств газовой и твердой фаз потока газозвеси, а также влияние процесса высушивания топливных частиц на скорость охлаждения газа и нагрева частиц.

7. На основании технико-экономических расчетов установлены предпочтительные значения скорости несущей газовой фазы, концентрации топливных частиц в потоке и диаметра реактора - пирогазификатора. Сравнительный анализ различных вариантов закалочного реактора по величине энергетического коэффициента позволил сформулировать рекомендации по выбору основных рабочих параметров устройства закалки газов пиролиза.

8. Совокупность разработанных в диссертации методик расчета проточных трубчатых реакторов для пирогазификации твердого топлива и закалки получаемого целевого газа следует рассматривать как необходимую научную основу для проектирования головных установок в схемах комплексного энерготехнологического топливоиспользования.



**Основные положения диссертации опубликованы  
в следующих печатных работах:**

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Косова О.Ю. Расчет трубчатого реактора типа «газовзвесь» для термической обработки твердого топлива // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2007. – № 3 (26). – Вып. 1. – С. 128-131.

2. Косова О.Ю. Математическая модель трубчатого реактора типа «газовзвесь» для закалки газов пиролиза твердого топлива // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2008. № 2(32).– Вып. 1. – С. 137-141.

Патент

3. Косова О.Ю. Установка для термической обработки измельченного твердого топлива / О.Ю. Косова и др. // Патент РФ на изобретение № 2315910; Бюл. №3 от 27.01.2008.

В других изданиях

4. Печенегова О.Ю.\* Гидравлическое сопротивление неизотермического турбулентного потока газа в трубе / О.Ю. Печенегова, Ю.Я. Печенегов // Труды Второй Российской национальной конференции по теплообмену: в 8 т. –Т. 8: Студенческая секция. – М.: Изд-во МЭИ, 1998. – С. 42-43.!

5. Печенегова О.Ю. Метод расчета теплообмена турбулентного потока в трубе / Ю.Я. Печенегов, О.Ю. Печенегова // Повышение эффективности теплообменных процессов и систем: материалы II Междунар. науч.-техн. конф.: в 2 ч.– Вологда: Вол. ГТУ, 2000. –Ч.2. – С. 172-173.

6. Печенегова О.Ю. К вопросу о стабилизации теплообмена потока газозвеси в трубе / Ю.Я. Печенегов, О.Ю. Печенегова // Тепло массообмен ММФ-2000: материалы IV Минского Междунар. форума: в 9 т.–Т. 6. Теплообмен в дисперсных системах. – Минск: АНК «ИТМО им. А.В. Лыкова» НАНБ, 2000. – С. 257-261.

7. Печенегова О.Ю. Математическая модель теплообмена при течении газозвеси в трубе / Ю.Я. Печенегов, О.Ю. Печенегова, В.Ф. Симонов // Тепло- и массообмен в химической технологии: материалы докл. Всерос. науч. конф. – Казань: КГТУ, 2000. – С.50-51.

8. Печенегова О.Ю. Расчет трубчатых реакторов для термической обработки пылевидного твердого топлива в потоке газозвеси / Ю.Я. Печенегов, О.Ю. Печенегова, В.Ф. Симонов // Прогрессивные процессы и

---

\* Печенегова О. Ю. изменила фамилию на – Косова О. Ю., в соответствии со свидетельством о браке I-РУ №531966 от 05 августа 2000 г.

оборудование металлургического производства: материалы 2-й Всерос. науч.-техн. конф. – Череповец: ЧГУ, 2001. – С.33-35.

9. Косова О.Ю. Математическое моделирование теплообмена потока газозвеси в трубе / Ю.Я. Печенегов, О.Ю. Косова // Физические основы экспериментального и математического моделирования процессов газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: труды XIII школы–семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева: в 2 т.– М.: Изд-во МЭИ, 2001. –Т.2. – С. 39-41.

10. Косова О.Ю. Теплообмен и гидравлическое сопротивление потока газозвеси в трубчатом реакторе / Ю.Я. Печенегов, В.Ф. Симонов, О.Ю. Косова // Теплофизические измерения в начале XXI века: материалы Четвертой Междунар. теплофизич. школы: в 2 ч.– Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2001. – Ч.1. – С. 67-68.

11. Косова О.Ю. Оптимизация параметров трубчатых реакторов для термической обработки пылевидного топлива в потоке газозвеси // Технические, экономические и экологические проблемы энергосбережения: материалы Междунар. конф. – Саратов: СГТУ, 2001. – С. 36-38.

12. Косова О.Ю. Теплообмен при течении в трубе газозвеси с различными размерами твердых частиц и их скорости на входе / Ю.Я. Печенегов, О.Ю. Косова // Труды Третьей Российской национальной конференции по теплообмену: в 8 т. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. –Т. 5. – С. 291-292.

13. Косова О.Ю. Метод расчета теплообмена при течении в трубе газозвеси с термохимически разлагающейся твердой фазой / Ю.Я. Печенегов, О.Ю. Косова // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: труды XIV школы–семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева: в 2 т. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – Т. 1. – С. 306-308.

14. Косова О.Ю. Расчет характеристик теплообмена потока газозвеси в трубе / Ю.Я. Печенегов, О.Ю. Косова // V Минский Междунар. форум по тепло - и массообмену: тез. докл. и сообщ.: в 2 т.– Минск: АНК «ИТМО им. А.В. Лыкова» НАНБ, 2004. – Т. 2. – С. 155-157.

15. Косова О.Ю. Установка для термической переработки пылевидного сланца // Горючие сланцы – альтернативный источник топлива и сырья. Фундаментальные исследования. Опыт и перспективы: материалы Междунар. науч. конф. – Саратов: СГТУ, 2007. – С. 108-112.

16. Косова О.Ю. Расчет теплогидравлических характеристик трубчатого реактора для пиролиза твердого топлива в потоке газозвеси / Ю.Я. Печенегов, О.Ю. Косова // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: труды XVI школы–семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева: в 2 т.– М.: Издат. дом МЭИ, 2007. –Т. 2. – С. 305-307.

17. Косова О.Ю. Расчет теплогидравлических характеристик трубчатого реактора типа «газовзвесь» для закалки газов пиролиза твердого топлива / Ю.Я. Печенегов, О. Ю. Косова // VI Минский Междунар. форум по тепло- и массообмену: тез. докл. и сообщ.: в 2 т.– Минск: АНК «ИТМО им. А. В. Лыкова» НАНБ, 2008. – Т. 2. – С. 153-154.

18. Косова О. Ю. Математическое моделирование нагрева влажного твердого материала в проточных трубчатых теплоутилизаторах типа «газовзвесь»/ Ю. Я. Печенегов, О. Ю. Косова// Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ-2008: труды Третьей Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 т.– М.: МГУПБ, 2008. –Т. 1. – С. 106-111.

**КОСОВА Ольга Юрьевна**

**РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВКИ  
ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ**

Автореферат

Корректор О. А. Панина

Подписано в печать 23.12.08

Формат 60×84 1/16

Бум. офсет.

Усл.-печ. л. 1,0

Уч.-изд. л. 1,0

Тираж 100 экз.

Заказ 389

Бесплатно

Саратовский государственный технический университет

410054, Саратов, Политехническая ул., 77

Отпечатано в РИЦ СГТУ, 410054, Саратов, Политехническая ул., 77