

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт энергетических исследований Российской академии наук (ИНЭИ РАН)

д.т.н., академик РАН

С.П. Филиппов

« 15 » февраля 2024 г.

О Т З Ы В

ведущей организации - Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт энергетических исследований Российской академии наук (ИНЭИ РАН) на диссертационную работу Донского Игоря Геннадьевича «Оценка эффективности энергетических технологий на основе перспективных процессов газификации твердых топлив с помощью кинетико-термодинамических моделей», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы.

« 15 » февраля 2024 года

г. Москва

Актуальность темы исследования

Диссертационная работа И.Г.Донского гармонично объединяет две составляющие – проблемную и методическую. Проблемная постановка заключается в поиске и оценке новых способов эффективного использования твердых топлив в энергетике и смежных отраслях. В свете глобальных планов относительно декарбонизации мировой экономики остро встали вопросы климатической безопасности широкомасштабного сжигания ископаемых углей, получения новых искусственных топлив из растительной биомассы, цивилизованного обращения с коммунальными и промышленными отходами. Обновленные критерии эффективности предполагают глубокую переработку углеродсодержащих горючих материалов с получением климатически чистых продуктов топливного и нетопливного назначения. Процессы глубокой переработки таких материалов протекают, как правило, через стадию термохимической конверсии, что допускает улавливание углекислого газа и дает старт разветвленной цепочке синтезов на основе монооксида углерода и водорода.

Методическая составляющая диссертационной работы находит выражение в четком выделении класса математических моделей, применяемых автором для имитации процессов термохимической конверсии и прогнозирования их

результатов. Кинетико-термодинамические модели представляют собой гибридные модели, гибко сочетающие два связанных, но принципиально разных подхода к описанию превращений в реагирующих физико-химических системах. Нередко эти подходы противопоставляют друг другу, однако такая точка зрения неверна. Начиная с первых вычислительных моделей химической кинетики, например, моделей Я.Б.Зельдовича, применяется квазистационарная аппроксимация. Именно она позволила определять реалистичные траектории эволюции сложных химических систем при ограниченной экспериментальной информации. В последующем разные сочетания двух подходов с успехом применялись в моделях химических реакторов, разработанных Й. Кеком, Х. Метгалчи, Д. Хильдебрандт, а позже Д. Глассером, М. Файнбергом, А.Н. Горбанем и В.И. Быковым. Работа И.Г. Донского продолжает идейный ряд работ указанных авторов и распространяет общий подход на процессы и установки в энергетике.

Общая характеристика диссертации

Диссертация изложена на 370 страницах, включает введение, семь глав, заключение и список литературы из 784 наименований.

Во *введении* автор обосновывает актуальность темы, описывает объект, предмет и цель своего исследования, излагает вынесенные на защиту положения диссертации.

В *первой главе* представлен обзор возможных направлений использования твердых топлив, интерес к которым усилился в связи с климатической повесткой. В обзоре автор правильно выделяет точки роста твердотопливных энергетических технологий и демонстрирует хорошее владение информацией о современном состоянии научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области глубокой переработки и эффективного сжигания твердых топлив. Приведены достигнутые показатели эффективности технологий. Корректно указаны существующие трудности в исследовании, численном описании процессов термохимической конверсии и управлении ими.

Во *второй главе* изложен разработанный автором метод для задач с частичным равновесием. Описана построенная с его применением математическая модель. Отражены результаты применения полученного инструмента для решения практически значимых задач.

Третья глава диссертации посвящена вопросу, представляющему большую сложность для исследования термохимических процессов с участием кислородсодержащих, особенно лигноцеллюлозных топлив, а также для практической эксплуатации соответствующих технологических установок – образованию смолистых продуктов. Предложены несколько модификаций математических моделей, предназначенных для прогнозирования образования смол и их термического разложения. Рассмотрены несколько способов контроля,

предложенных для подавления выхода смолистых продуктов, включая вторичное дутье, ступенчатые схемы организации процесса и каталитическое разложение.

Четвертую главу своего исследования автор посвятил также практически и теоретически сложному случаю – агломерации топлива в объеме аппарата при работе на спекающемся топливе и в присутствии плавких компонент. Сильной стороной этой части работы выступает обстоятельное экспериментальное подтверждение разработанных автором математических моделей.

В *пятой главе* рассмотрены процессы газификации в потоке, представляющие наиболее вероятное направление развития крупнотоннажной техники газификации твердых топлив. В том числе, сопоставлены процессы парокислородной конверсии древесной пыли в синтез-газ, совместная газификация биомассы с углем, высокотемпературная газификация угля с использованием воздушного и паровоздушного дутья.

Шестая глава представляет полученные автором оценки для перспективных процессов кислородной и парокислородной газификации угля. Огромный интерес к процессам этого класса обусловлен возможностью улавливания углекислого газа при сжигании. При этом затраты на кислородное сжигание оказываются существенно ниже, чем при улавливании CO_2 из продуктов сгорания в условиях воздушного дутья.

В *седьмой главе* описаны методика и результаты параметрической оптимизации парогазовой установки с внутрицикловой газификацией бурого угля. Эта часть работы выполнена автором в кооперации с коллегами, развивающими передовой вычислительный комплекс СМПП-ПК. В рамках этого сотрудничества ранее построенная принципиальная модель ПГУ с ВЦГ была модернизирована путем инкорпорирования в нее более реалистичной модели поточной газификации, разработанной автором диссертации. Такая модернизация позволила существенно уточнить ранее полученные оценки эффективности такой установки при работе на углях восточно-сибирских месторождений.

В *заключении* перечислены полученные в работе результаты, кратко отмечены достигнутые преимущества разработанных методов и моделей. Указаны шесть направлений дальнейшего развития работы.

Новизна полученных результатов и выводов

Предложенный в работе метод построения гибридных кинетико-термодинамических моделей является авторским. Он следует общей идеологии построения гибридных моделей, однако выводит вычислительные инструменты с уровня демонстрации работоспособности на уровень рутинных практических расчетов. Новым является также применение данного гибридного подхода к процессам переработки твердых топлив.

Полученные с помощью предложенных автором моделей оценки, касающиеся показателей эффективности перспективных технологий, также являются новыми и представляют практический интерес.

Определенной новизной обладают и собственно вычислительные алгоритмы, реализующие гибридные модели. Отдельного упоминания заслуживает процедура согласования решений для системы субмоделей разного типа.

Обоснованность и достоверность результатов исследования

Представленные в работе результаты обоснованы и не вызывают сомнений в достоверности по ряду причин. Автор достаточно подробно и доступно излагает разработанные им модели, их идейную основу и математический аппарат. Применяемые автором алгоритмы прошли апробацию на большом числе практически значимых задач, в том числе, в рамках ряда проектов, поддержанных ведущими научными фондами. Публикации автора известны в научной печати, пользуются вниманием и служат объектом цитирования. Наконец, полученные в расчетах качественные зависимости и численные значения промежуточных и искомых величин находятся в хорошем согласии с известными закономерностями и статистическими оценками.

Апробация работы и публикации

Результаты диссертационной работы И.Г. Донского опубликованы в 41 печатной работе, в том числе в высокорейтинговых изданиях в России и за рубежом. Требования ВАК РФ относительно числа публикаций по специальности 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы – соблюдены.

Результаты, составившие отдельные части работы, обнародованы на более, чем 30 научных мероприятиях в России и за рубежом.

Соответствие содержания диссертации автореферату и паспорту специальности

Содержание автореферата с достаточной полнотой отражает все части диссертационной работы.

Диссертационное исследование соответствует паспорту специальности 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы, в том числе следующим пунктам:

Пункту 1: разработка научных основ (подходов) исследования общих свойств и принципов функционирования и методов расчета, алгоритмов и программ выбора и оптимизации параметров, показателей качества и режимов работы энергетических систем, комплексов, энергетических установок на органическом и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии в целом и их основного

и вспомогательного оборудования. В диссертационной работе предложены новые подходы к оценке режимов конверсии твердых органических топлив в энергетических установках, которые позволяют уточнять оптимальные условия работы реакторов конверсии и выбирать эти условия в зависимости от параметров топлива и энергетического оборудования.

Пункту 2: математическое моделирование, численные и натурные исследования физико-химических и рабочих процессов, протекающих в энергетических системах и установках на органическом и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии, их основном и вспомогательном оборудовании и общем технологическом цикле производства электрической и тепловой энергии. Основным инструментом для оценки технико-экономических показателей энергетических установок, рассмотренных в диссертации, являются математическое моделирование. Оптимизация режимов конверсии органических топлив проводится путем численных расчетов. Для валидации моделей используются экспериментальные данные, включая полученные при участии автора. Кроме того, автором спланированы и проведены эксперименты для исследования условий спекания топливных смесей.

Пункту 6: теоретический анализ, экспериментальные исследования, физическое и математическое моделирование, проектирование энергоустановок, электростанций и энергетических комплексов, функционирующих на основе преобразования возобновляемых видов энергии (энергии водных потоков, солнечной энергии, энергии ветра, энергии биомассы, энергии тепла земли и других видов возобновляемой энергии) с целью исследования и оптимизации их параметров, режимов работы, экономии ископаемых видов топлива и решения проблем экологического и социально-экономического характера. В диссертационной работе исследованы способы энергетической конверсии растительной биомассы и твердых коммунальных отходов, которые относятся к возобновляемым источникам энергии. Для этого разработаны математические модели, а также проведены экспериментальные исследования.

Теоретическая значимость

В работе предложен ряд новых математических моделей термохимической конверсии твердого топлива, относящихся к классу гибридных кинетико-термодинамических моделей. Модели данного класса являются современной точкой роста в развитии методов проектирования и исследования технологических установок в химической промышленности, нефтепереработке, газохимии и, теперь, энергетике.

Практическая ценность

Как полученные в работе результаты, так в еще большей степени и разработанные в работе математические модели представляют очевидный

практический интерес для разработчиков энергетических и энерготехнологических установок. На базе разработанных моделей возможно создание цифровых двойников для установок термохимической конверсии, позволяющих в реальном времени идентифицировать параметры технологического оборудования, выполнять диагностику блоков и подсистем в составе энерготехнологических производств, а также создавать средства автоматизированного проектирования оборудования путем инкорпорирования моделей и кодов в САПР типа CAE и CAD.

Реализация результатов работы

Разработанные в рамках исследования математические модели реализованы в форме компьютерных кодов. Созданное программное обеспечение применено в ходе выполнения ряда научно-исследовательских проектов, поддержанных грантами ведущих научных фондов.

Замечания по работе

1. В разделе 6.5 учтены энергетические и финансовые затраты на удаление углекислого газа из продуктов сгорания. Исходные данные для расчетов приняты по данным китайского проекта. В табл. 6.3 указывается величина 8,4 МДж/кг, однако ниже указан диапазон от 4 до 9 МДж/кг. Не вполне понятно, какое именно значение использовано в расчетах. Кроме того, в работе нет оценок, насколько представительны стоимостные данные о китайском проекте на фоне общемировой картины.
2. Изменение состава оборудования, в общем случае, влечет за собой изменение КПД цикла за счет интеграции элементов, поэтому использованные в разд. 6.5 предположения требуют дополнительного обсуждения границ применимости.
3. В разделе 3.5 рассмотрена ступенчатая газификация биомассы. Следует заметить, что коэффициент избытка окислителя на стадии сжигания пирогаза зависит от стехиометрического количества воздуха, которое, в свою очередь, зависит от количества пирогаза. То есть, переменные в расчетах не являются независимыми: чем больше теплоты возвращается на пиролизическую ступень, тем больше горючего газа на ней производится, а значит, тем больше воздуха требуется для его полного сжигания.
4. Автор утверждает, что разработанные им модели представляют интерес для проектировщиков соответствующего оборудования. С этим можно согласиться, но с одной оговоркой. Выбор параметров оборудования выбирают с учетом поведения целевых процессов в условиях пуска, останова и изменения нагрузки. Поэтому для проектировщиков не менее важны параметры переходных режимов. Автору следовало бы запланировать разработку модификаций этих же моделей, допускающих расчет переходных режимов.
5. В представленном на отзыв экземпляре диссертации почему-то оказалось два раздела с номером 1.3. Возможно, ведущая организация получила свой

экземпляр раньше других, и данный недостаток исправлен в других экземплярах.

Заключение

Исходя из сказанного выше, диссертационная работа И.Г. Донского «Оценка эффективности энергетических технологий на основе перспективных процессов газификации твердых топлив с помощью кинетико-термодинамических моделей» является законченной научно-квалификационной работой и соответствует п.п. 9-14 «Положения о порядке присуждении ученых степеней» (Утв. Пост. Правительства от 24.09.2013 N 842 с изм. и доп.).

В работе решена важная для экономики задача, а именно разработан ряд новых математических моделей, необходимых для разработки и проектирования технологических процессов глубокой переработки твердых топлив, включая уголь и твердые отходы. Выполнение данной работы обеспечило значительное продвижение в области численного описания таких процессов и привело к получению значимых результатов в области оценки и выбора направлений совершенствования указанных технологических процессов. Полученные результаты обладают очевидной научной ценностью и имеют практическую значимость. Самостоятельность выполнения работы не вызывает сомнений. Личный вклад автора в выполнение работы является определяющим, признаки конфликта интересов отсутствуют. Тематика диссертации соответствует научной специальности 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы. Изложенные в тексте работы результаты прошли достаточную апробацию и получили отражение в рецензируемых изданиях.

Сделанные замечания являются техническими и не снижают общего положительного впечатления о представленной диссертационной работе.

Диссертация И.Г.Донского «Оценка эффективности энергетических технологий на основе перспективных процессов газификации твердых топлив с помощью кинетико-термодинамических моделей», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы, удовлетворяет установленным требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Донской Игорь Геннадьевич, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук.

Отзыв подготовлен доктором технических наук (научная специальность 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы), главным научным сотрудником Института энергетических исследований Российской академии наук (ИНЭИ РАН) Кейко Александром Владимировичем.

Настоящий отзыв на диссертацию обсужден и одобрен на совместном научном семинаре Отдела исследования взаимосвязей энергетики с экономикой (Отдел №1), Отдела научных основ развития систем энергетики (Отдел №2) и Отдела исследования энергетического комплекса мира и России (Отдел №3) ИНЭИ РАН, протокол № 1 от «14» февраля 2024 года.

Главный научный сотрудник ИНЭИ РАН,
доктор технических наук

А.В. Кейко

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт энергетических исследований Российской академии наук (ИНЭИ РАН),

Адрес: 117186, г. Москва, ул. Нагорная, 31, корп. 2

Телефон +7 499 127 4664

Электронная почта: info@eriras.ru

Сайт: www.eriras.ru

Я, Кейко Александр Владимирович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Донского Игоря Геннадьевича, и их дальнейшую обработку.

Подпись:

А.В. Кейко

