

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.118.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ ИМЕНИ Л.А.
МЕЛЕНТЬЕВА СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК,
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА
НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 21.03.2024 № 5

О присуждении Донскому Игорю Геннадьевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора технических наук.

Диссертация **«Оценка эффективности энергетических технологий на основе перспективных процессов газификации твердых топлив с помощью кинетико-термодинамических моделей»** по специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы принята к защите 15 декабря 2023 года (протокол заседания №14) диссертационным советом 24.1.118.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики имени Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, совет создан приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации №78/нк от 26.01.2023.

Соискатель **Донской Игорь Геннадьевич**, 17 февраля 1989 года рождения, в 2010 году окончил Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Иркутский государственный университет» по специальности «химия».

Диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук «Моделирование и оптимизация режимов работы газогенератора плотного слоя для парогазовой мини-ТЭС» (специальность 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы) защитил в 2014 году в диссертационном совете Д 003.017.01, созданном на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики имени Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

В настоящее время Донской Игорь Геннадьевич работает в должности старшего научного сотрудника в отделе теплосиловых систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики имени Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена в отделе теплосиловых систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики имени Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Официальные оппоненты:

Елсуков Владимир Константинович, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Братский государственный университет», кафедра энергетики, профессор;

Марьяндышев Павел Андреевич, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Северный (Арктический) Федеральный университет им. М.В. Ломоносова», Высшая школа энергетики, нефти и газа, кафедра теплоэнергетики и теплотехники, профессор;

Мингалеева Гузель Рашидовна, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Казанский государственный энергетический университет, Институт теплоэнергетики, кафедра «Энергетическое машиностроение», заведующий кафедрой;

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт энергетических исследований Российской академии наук (г. Москва). **В своем положительном отзыве**, подписанном Кейко Александром Владимировичем, доктором технических наук, главным научным сотрудником отдела исследования взаимосвязей энергетики с экономикой, и утвержденном директором института, доктором технических наук, академиком РАН Филипповым Сергеем Петровичем, указала, что диссертационная работа И.Г. Донского является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена важная для экономики задача, а именно разработан ряд математических моделей, необходимых для разработки и проектирования технологических процессов глубокой переработки твердых топлив, включая уголь и твердые отходы.

Соискатель имеет более 150 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликована 41 работа, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 29 работ, в том числе 7 – в журналах из категорий К1 и К2 списка ВАК, относящихся к специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы.

Результаты диссертационной работы полно отражены в опубликованных работах. Число и качество публикаций соответствуют требованиям, предъявляемым к соискателям ученой степени доктора наук.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах. Текст диссертации не содержит некорректных заимствований. В списке основных работ 19 публикаций написаны автором лично, остальные – в соавторстве.

Перечень основных работ:

1. Донской, И.Г. Влияние смолообразования на эффективность процесса воздушной газификации биомассы / И.Г. Донской // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. - 2015. - № 5-6. - С. 93-100. (К2 из перечня ВАК)
2. Донской, И.Г. Численное исследование режимов работы одноступенчатого поточного газогенератора с паровоздушным дутьем / И.Г. Донской // Вестник ЮУрГУ. Серия "Энергетика". - 2017. - Т. 17. - № 3. - С. 13–23. (К1 из перечня ВАК)
3. Донской, И.Г. Численное исследование режимов газификации угля и биомассы в поточном газогенераторе с парокислородным дутьем / И.Г. Донской // Вестник ЮУрГУ. Серия "Энергетика". - 2018. - Т. 18. - № 3. - С. 14-21. (К1 из перечня ВАК)
4. Донской, И.Г. Математическое моделирование газификации древесины смолистых продуктов на частицах активных компонентов / И.Г. Донской // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. - 2018. - Т. 20. - № 11-12. - С. 107-117. (К2 из перечня ВАК)
5. Донской, И.Г. Влияние параметров дутья на эффективность ступенчатого процесса высокотемпературной пылеугольной газификации / И.Г. Донской // Вестник ЮУрГУ. Серия "Энергетика". - 2020. - Т. 20. - № 1. - С. 12-21. (К1 из перечня ВАК)

6. Донской, И.Г. Математическое моделирование термического разложения смолистых веществ в процессе обращенной газификации растительной биомассы / И.Г. Донской // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. - 2020. - Т. 22. - № 5. - С. 83-93. (К2 из перечня ВАК)
7. Донской, И.Г. Влияние добавок водяного пара и диоксида углерода на характеристики процесса кислородной газификации пылеугольного топлива / И.Г. Донской // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия "Энергетика". - 2021. - Т. 21. - № 1. - С. 21-28. (К1 из перечня ВАК)
8. Донской, И.Г. Численное исследование эффективности совместной слоевой газификации древесной биомассы и муниципальных отходов / И.Г. Донской // Известия РАН. Энергетика. - 2021. - № 3. - С. 54-69.
9. Donskoi, I.G. Mathematical modeling of the reaction zone of a Shell-Preflo gasifier with the use of the models of sequential equilibrium / I.G. Donskoi // Solid Fuel Chemistry. - 2016. - V. 50. - No. 3. - P. 191-196.
10. Donskoi, I.G. Process simulation of the co-gasification of wood and polymeric materials in a fixed bed / I.G. Donskoi // Solid Fuel Chemistry. - 2018. - V. 52. - No. 2. - P. 121-127.
11. Донской, И.Г. Математическое моделирование совместной конверсии угля и шлама сточных вод в обращенном слоевом газогенераторе / И.Г. Донской // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. - 2019. - Т. 330. - № 2. - С. 7-18.
12. Donskoy, I.G. Influence of coal-biomass fuel composition on the efficiency of its conversion in entrained-flow gasifiers / I.G. Donskoy // Solid Fuel Chemistry. - 2019. - V. 53. - No. 2. - P. 113-119.
13. Donskoi, I.G. Simulation and Optimization of Wood Biomass Gasification Regimes in a Flow of Steam-Oxygen Blast / I.G. Donskoi // Russian Journal of Applied Chemistry. - 2020. - V. 93. - No. 4. - P. 519-526.
14. Donskoi, I.G. Influence of the composition of solid fuel on the equilibrium characteristics of a gasification process in the mixtures of oxygen and carbon dioxide / I.G. Donskoi // Solid Fuel Chemistry. - 2021. - V. 55. - No. 6. - P. 399-406.
15. Донской, И.Г. Анализ эффективности процесса газификации пылеугольного топлива в высокотемпературном потоке O_2/N_2 и O_2/CO_2 с помощью математического моделирования / И.Г. Донской // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. - 2021. - Т. 332. - № 11. - С. 127-140.
16. Donskoy, I. Influence of heating conditions on formation and development of agglomerates in a reactive porous medium / I. Donskoy // Heat Transfer Research. - 2022. - V. 53. - No. 12. - P. 25-36.
17. Donskoy, I.G. Decomposition of the problem in the numerical solution of differential-algebraic systems for chemical reactions with partial equilibria / I.G. Donskoy // Bulletin of the South Ural University. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software. - 2022. - V. 15. - No. 4. - P. 59-70.
18. Donskoy, I. Techno-Economic Efficiency Estimation of Promising Integrated Oxyfuel Gasification Combined-Cycle Power Plants with Carbon Capture / I. Donskoy // Clean Technologies. - 2023. - V. 5. - P. 215-232.
19. Donskoy, I. Particle Agglomeration of Biomass and Plastic Waste during Their Thermochemical Fixed-Bed Conversion / I. Donskoy // Energies. - 2023. - V. 16. - P. 4589.

На диссертацию и автореферат поступили 6 отзывов (все отзывы положительные):

1) Отзыв **Рыжкова Александра Филипповича**, доктора технических наук, профессора, профессора кафедры тепловых электрических станций Уральского энергетического института, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина"; содержит *десять замечаний*: 1. Утилитарное («бухгалтерское») название темы диссертации узкое и весьма неудачное. 2. Несмотря на акцент, отмеченный в первом замечании, работа носит академический характер, и вопрос практической значимости проработан слабо, без привязки к реальному сектору экономики и не подкреплен отзывами представителей бизнеса. 3. Приведенные на рис. 15 зависимости получены в предположении об аддитивности температуры плавления золы, что является довольно грубым приближением. Чем оно обосновывается? Можно ли учесть взаимодействие минеральной части угля и биомассы в рамках модели автора? 4. Эксергетический КПД газификации в высокотемпературном дутье является малоинформативным критерием, если генераторный газ охлаждается на стадии очистки. 5. Расчеты автора (рис. 18) показывают, что при газификации бурых углей наблюдается существенный выход недожога. Означает ли это, что ПГУ-ВЦГ, описанная в седьмой главе, также работает с высоким выходом недожога? 6. Рис. 3 и 11: слишком мелкий шрифт затрудняет понимание рисунков даже в электронной версии автореферата. В печатном виде текст может быть нечитабельным. 7. Рис. 4: на рисунке приведены результаты валидации разработанной модели по экспериментальным данным, полученным на слоевой и поточной установке. В тексте к этому рисунку не дается пояснений, как одна и та же модель одинаково хорошо применима для принципиально разных процессов газификации (слоевого и поточного). С термодинамической точки зрения слоевые и поточные процессы могут быть близки, но кинетические ограничения делают их сильно отличными друг от друга. В связи с этим принято использовать разные модели для слоевых и для поточных процессов. Создание одной большой универсальной модели выглядит неоправданным шагом, так как она будет проигрывать в скорости и точности нескольким специализированным моделям. 8. Рис. 7. Избыток воздуха обозначен символом α . При этом на рис. 9 символом α уже обозначен коэффициент избытка окислителя. Отсюда возникает вопрос: величины, обозначенные символом α , вычислялись по одной формуле? Если да, то эту формулу следовало бы привести, и везде в работе использовать один термин. При исследовании широкого круга режимов принято пользоваться термином «коэффициент расхода окислителя», так как именно он наиболее полно отражает физику исследуемых процессов. 9. В описании модели не сказано, что она содержит подмодели, способные отражать процесс образования агломератов. Кинетическая и термодинамическая модели могут лишь косвенно описывать возникновение агломераций. В связи с этим непонятно, какой метод использовался для моделирования образования агломераций. 10. На стр. 23 написано, что проведено моделирование поточной парокислородной газификации биомассы с использованием литературных экспериментальных данных. Однако в этих экспериментах в качестве топлива использовалась пеллетированная и/или торрефицированная биомасса, которая существенно отличается от сырой биомассы и близка к угольному топливу. Без указания данного момента (специальной подготовки биомассы) дальнейший анализ не полностью отражает действительность.

2) Отзыв **Стрижака Павла Александровича**, доктора физико-математических наук, профессора, профессора Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова, заведующего кафедрой тепломассопереноса, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет"; содержит *три замечания*: 1. На рис. 2 автореферата приведены литературные данные без ссылок на первоисточники. Это

затрудняет анализ источника данных, при каких условиях и для каких рабочих сред они получены. 2. Для всех экспериментальных данных целесообразно привести доверительные интервалы и указать СКО с целью пояснения реального рассева результатов опытов. 3. Границы применимости созданного кинетико-термодинамического подхода по свойствам и составу топлив, а также условиям термической конверсии целесообразно строго определить с учетом максимальных погрешностей прогнозирования ключевых характеристик газификации твердых топлив, отходов и их смесей.

3) Отзыв **Суслова Константина Витальевича**, доктора технических наук, доцента, профессора кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ"; содержит *два замечания*: 1. Каковы критерии экономичности, предъявляемые к вычислительной схеме для расчета состояния реакционной зоны (стр. 16)? 2. Автор посвящает значительный объем пятой главы процессам газификации в высоконагретом воздухе, при этом пренебрегая затратами на этот нагрев.

4) Отзыв **Зайченко Виктора Михайловича**, доктора технических наук, главного научного сотрудника лаборатории распределенной генерации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук; содержит *одно замечание*: Отсутствует расшифровка обозначений представленных на рис. 8 графиков, что несколько затрудняет восприятие изложенного материала.

5) Отзыв **Суслова Дмитрия Сергеевича**, доктора химических наук, доцента, профессор кафедры физической и коллоидной химии Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет»; содержит *два замечания*: 1. Каким образом определялся перечень необходимых для моделирования стехиометрических уравнений, особенно для решения задач по совместной газификации отходов? 2) Не совсем ясно насколько исчерпывающе был выбран перечень формально-кинетических параметров отдельных химических реакций для построения математических моделей.

6) Отзыв **Смовжа Дмитрия Владимировича**, доктора физико-математических наук, старшего научного сотрудника лаборатории синтеза новых материалов Федерального бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук; содержит *три замечания*: 1. Из представленного в Главе 2 описания используемой математической модели, а точнее главных ее принципов, сложно оценить степень оригинальности и новизны предлагаемых в работе подходов. 2. При анализе процессов агломерации при газификации отходов не уделяется внимания теплофизическим свойствам пластика, добавляемого в топливо, не понятно, имеет ли значение температура плавления, теплоемкость и вязкость аддитива на процесс спекания? Насколько могут быть обобщены результаты, полученные для композитов с полиэтиленом? 3. В автореферате не представлены данные об агрегатах, на которых проходила экспериментальная верификация расчетных данных.

Замечания не снижают научной ценности и практической значимости диссертационной работы. На замечания оппонентов и ведущей организации, а также на замечания в отзывах, поступивших на автореферат и диссертацию, соискатель привел исчерпывающие ответы.

Выбор ведущей организации обосновывается тем, что в Институте энергетических исследований РАН существует известная научная школа, представители которой занимаются системным анализом энергетических технологий и проблемами научно-технологического прогресса в энергетике, в т.ч. экономическими и экологическими аспектами энергетического использования топлив. Широко известны

труды таких ученых-энергетиков, как академик РАН С.П. Филиппов, д.т.н. А.В. Кейко, д.т.н. Ю.А. Плакиткин и др.

Выбор официального оппонента В.К. Елсукова обосновывается тем, что он является доктором технических наук по специальности 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы, занимается исследованиями процессов в теплоэнергетических установках, в т.ч. термодинамическим моделированием этих процессов (сжигание органического топлива, образование вредных веществ и т.д.).

Выбор официального оппонента Г.Р. Мингалеевой обосновывается тем, что она является доктором технических наук по специальности 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика, занимается исследованиями промышленных теплоэнергетических систем с использованием твердых топлив и математическим моделированием процессов подготовки и конверсии топлив в топках и газогенераторах.

Выбор официального оппонента П.А. Марьяндышева обосновывается тем, что он является доктором технических наук по специальности 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика, занимается исследованиями в области реакционной способности твердых топлив (в первую очередь, биотоплив), а также проблемами сжигания низкосортных топлив в энергетических котлах.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработан новый гибридный кинетико-термодинамический подход к моделированию процессов термохимической конверсии твердых топлив в реакторах разных типов;

предложены новые вычислительные алгоритмы для расчета характеристик процессов газификации твердых топлив на основе разработанного подхода;

доказана термодинамическая эффективность новых перспективных схем ступенчатой конверсии твердых топлив с рекуперацией теплоты и рециркуляцией продуктов сгорания;

введены новые условия оптимальности режимов газификации топлив с учетом механической устойчивости и режимов шлакования.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказано существование термодинамических и кинетических факторов, ограничивающих достижение предельных значений эффективности процессов конверсии твердых топлив в традиционных процессах газификации;

применительно к проблематике диссертации результативно использован комплекс методов исследования, включающий численные методы решения дифференциальных уравнений переноса и оптимизационных задач химической термодинамики, а также экспериментальных методик исследования процессов горения и газификации топлив в лабораторных реакторах,

изложены элементы термодинамической теории ступенчатых процессов газификации твердых топлив, условия оптимального протекания процессов термохимической конверсии топлив в выбранных конфигурациях реакторных схем;

раскрыты несоответствия между результатами расчетов состава генераторного газа с помощью модели конечного равновесия и моделью автора, что позволяет более точно оценить эффективность энергетических установок с внутрицикловой газификацией углей;

изучены связи между технико-экономическими показателями установок с глубокой переработкой угля и условиями газификации (составом и реакционной способностью топлива, стехиометрическими условиями, временем пребывания и т.д.),

проведена модернизация существующих математических моделей, алгоритмов и численных методов, в том числе в форме, совместимой с разрабатываемым в ИСЭМ СО РАН программным комплексом «Система машинного построения программ».

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены в существующие программные комплексы новые программные модули, реализующие алгоритмы расчета процессов газификации твердых топлив на основе кинетико-термодинамического подхода;

определены оптимальные условия проведения новых процессов газификации углей в теплоэнергетических установках большой мощности;

создана система практических рекомендаций для выбора режимов газификации разных твердых топлив в реакторах разных типов на основе кинетико-термодинамических оценок;

представлены предложения по дальнейшему совершенствованию технологий термохимической конверсии твердых топлив в установках разной мощности.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ: результаты получены на сертифицированном оборудовании с помощью подтвержденных методик, показана воспроизводимость исследований;

теория опирается на известные физические законы с использованием надежных баз данных о свойствах веществ;

идея базируется на работах по термодинамическому анализу энергетических процессов, которые в течение долгого времени ведутся в подразделении, в котором работает автор;

использовано сравнение результатов, полученных автором с известными экспериментальными данными и вычислениями с использованием других вычислительных подходов других авторов;

установлено качественное и количественное совпадение данных автора с независимыми источниками по теме диссертационной работы;

использованы представительные выборочные совокупности данных с обоснованием выбора экспериментальных режимов.

Личный вклад соискателя заключается в постановке задач диссертационного исследования, разработке методологии исследования, создании математических моделей и вычислительных алгоритмов для поиска оптимальных условий газификации твердых топлив в энергетических установках, планировании экспериментов и анализе результатов измерений. Соискатель являлся руководителем и основным исполнителем научно-исследовательских работ по тематике диссертационной работы.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

- 1) Есть ли интерес к результатам работы со стороны бизнеса? Проводилось ли внедрение представленных разработок?
- 2) Можно ли использовать кинетические ограничения непосредственно в выражении для свободной энергии?
- 3) В работе используется много разных критериев эффективности. Как выбирается критерий эффективности для многоуровневой оптимизации?

Данные замечания не носят принципиального характера.

Соискатель Донской Игорь Геннадьевич ответил на заданные ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию.

- 1) Внедрение результатов не проводилось. Интересы со стороны бизнеса на настоящий момент нет.
- 2) Свободная энергия является функцией термодинамических переменных, поэтому использование кинетических закономерностей при записи выражения для свободной энергии неправомерно.
- 3) Критерий эффективности для вычислительного алгоритма – это частота обращений к программе решения задачи равновесия, критерии эффективности процесса газификации – химический и эксергетический КПД, для энергетической установки рассматриваются два критерия – КПД производства электроэнергии и цена электроэнергии. Оптимальное решение для энергоустановки ищется на полном наборе режимов работы газогенератора, включая неоптимальные.

На заседании 21 марта 2024 года диссертационный совет принял решение: за разработку нового теоретического подхода к исследованию технологических процессов в теплоэнергетических установках с газификацией твердых топлив, основанных на сочетании термодинамического и кинетического анализа, и полученные с помощью этого подхода результаты, совокупность которых можно квалифицировать как решение крупной научной проблемы, имеющей важное значение для энергетики и экономики России, присудить Донскому Игорю Геннадьевичу ученую степень доктора технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 6 докторов наук по специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы, участвовавших в заседании, из 20 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 18, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель диссертационного совета

Стенников Валерий Алексеевич

Ученый секретарь диссертационного совета

Солодуша Светлана Витальевна



21 марта 2024 г.