

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Кузнецова Виктора Александровича «Математическое моделирование процессов тепло- и массообмена для перспективных технологий энергетического использования угольного топлива», выполненную по специальности «01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника» на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Высокие значения концентраций наиболее опасных газовых антропогенных выбросов (NO_x и SO_x) типичных угольных ТЭС являются одной из основных причин интенсивных исследований мирового научного сообщества с целью поиска технологических решений, позволяющих сохранить лидирующие позиции угольной теплоэнергетики и снизить негативное влияние на окружающую среду. Ключевые направления развития угольной теплоэнергетики связаны с использованием систем газификации и переходом к водоугольным композициям. По этим причинам выбранная автором **тема диссертации**, заключающаяся в развитии методов математического моделирования взаимосвязанных процессов тепломассопереноса, фазовых превращений и химического реагирования при газификации и горении распыленного угольного топлива, **актуальна и перспективна**. Следует подчеркнуть, что диссертант сконцентрировал внимание **на двух ключевых и чрезвычайно перспективных направлениях**: газификация пылеугольного топлива и сжигание водоугольных композиций.

Тема диссертации соответствует приоритетному направлению развития науки в Российской Федерации (Указ Президента России от 07.07.2011 № 899): «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика» и находится в сфере критической технологии федерального уровня, получившей высокий рейтинг по перспективам развития: «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии». **Актуальность тематики исследований также подтверждает их выполнение в рамках грантов и договоров, указанных в статьях автора и диссертации.**

Диссертация В.А. Кузнецова состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 125 страниц с 56 рисунками и 22 таблицами. Список литературы содержит 108 наименований. Следует отметить хорошую структурированность рукописи диссертации и уместное использование автором разделов и дополнительных подразделов в каждой главе. Логические связи между последними соблюдены.

Во введении автор формулирует проблему, связанную с отсутствием к настоящему времени комплексных физических и математических моделей для достоверного прогнозирования эффективных характеристик процессов газификации угольного топлива и сжигания водоугольных композиций в современных энергетических установках. Также достаточно большое внимание уделено экологическим проблемам сжигания угольного топлива на ТЭС во всем мире.

В первой главе рецензируемой диссертации проведен анализ особенностей переработки угольного топлива традиционными способами, а также последние сравниваются с нетрадиционными. Приводится описание перспективных технологий переработки угольного топлива, а также факторы, сдерживающие широкомасштабное использование последних.

Во второй главе диссертации приведено описание использованной математической модели и методов расчета для описания процессов в топочной камере при поточной газификации угля и горения водоугольного топлива. Приведены краткие обоснования выбора методов и принятых допущений, а также упрощений при выполнении численных исследований.

В третьей главе приведены результаты тестирования математической модели и методов расчёта на основе известных литературных теоретических и экспериментальных данных. Представлены объяснения установленных отличий теоретических и экспериментальных значений исследованных характеристик. В целом достигнута удовлетворительная корреляция. Полученные отклонения объяснены. Определены возможные направления развития моделей для приближения теоретических значений характеристик к экспериментальным.

В четвертой главе диссертации представлены результаты математического моделирования исследованных автором процессов горения и газификации угольного топлива при нетрадиционных способах переработки угля, а также применении водоугольных композиций. Основное внимание уделено изучению условий и характеристик эффективного снижения выбросов NO_x . Рассмотрены вопросы повышения эффективности исследованных процессов при выработке тепловой и электрической энергии.

В заключении приведены основные выводы диссертационной работы.

Из анализа содержания рукописи диссертации можно заключить, что **научная новизна** рецензируемой диссертации В.А. Кузнецова заключается в следующем:

1. Развита физическая и математическая модели, а также методы расчетов процессов горения и газификации измельченного угольного топлива для нетрадиционных схем переработки. Используются перспективные модели турбулентности, многоступенчатых механизмов химического реагирования, сложного теплообмена, а также Лагранжевого описания движения и реагирования частиц угля и капель ВУТ.
2. Получены новые знания в области газификации угольного топлива. Показано, что увеличение α угла поворота горелок верхнего яруса в горизонтальной плоскости с 30 до 60 градусов приводит к повышению химического КПД с 84.7 до 86 %. Увеличение подачи пара с 0 до 0.5 кг. пара / кг. угля приводит к росту химического КПД процесса газификации с 83 до 87 % и снижению температуры на выходе из камеры газификации с 1414 до 1343 К.
3. Рассчитаны эффективные условия и интегральные параметры сжигания водоугольных суспензий. Показано, что концентрация оксидов азота в дымовых газах уменьшается на 30% при снижении средней температуры в объеме топочной камеры с 1400 до 1200 °С при $\alpha=1.25$ для режима жидкого шлакоудаления и с 1200 до 1100 °С при $\alpha=1.7$ для режима твердого

шлакоудаления. При сжигании ВУТ концентрация NO_x уменьшается в 2.5–10 раз по сравнению с традиционным факельным способом сжигания угля.

Следует отметить **обоснованность сформулированных научных положений** диссертационных исследований, которая заключается в убедительных заключениях и выводах, а также непротиворечащих физике приведенных гипотезах.

Практическая направленность диссертации В.А. Кузнецова заключается в том, что предложена модель, позволяющая достоверно прогнозировать интегральные характеристики сжигания перспективных водоугольных композиций и газификации угольного топлива с разными характеристиками и при варьировании параметров топочных камер. Следует подчеркнуть, что тестирование результатов моделирования выполнялось на реальных котельных агрегатах при использовании разных видов топлив и режимов работы. К диссертационной работе приложены справки об использовании результатов при подготовке студентов в Сибирском федеральном университете, а также в ЗАО «Корпорация Протэн» при выполнении текущих технологических проектов.

Достоверность полученных автором диссертации теоретических результатов основана на удовлетворительной корреляции с известными теоретическими данными других авторов и экспериментальными результатами, полученными на котельных агрегатах.

Анализ содержания рукописи и автореферата диссертации дает основание для формулирования нескольких **замечаний и рекомендаций**:

1. Обзор современных представлений об экспериментальных исследованиях и математическом моделировании процессов тепломассопереноса, фазовых превращений и химического реагирования при газификации угольных топлив и сжигании водоугольных топливных композиций выполнен достаточно поверхностно, так как использованы ссылки только на отечественные публикации. В течение последних 5 лет опубликованы более 300 статей по данной проблематике в известных международных журналах,

в частности, Fuel, Combustion and Flame, Combustion Science and Technology, Combustion Theory and Modelling, Energy, Fuel Processing Technology, Applied Thermal Engineering, Applied Energy, Journal of Hazardous Materials, Journal of Cleaner Production, Renewable Energy, Energy Technology, Energy Conversion and Management, Energy&Fuels, Energies, Renewable & Sustainable Energy Reviews, Proceedings of the Combustion Institute, Powder Technology и др. Интерес представляет как раз сравнительная оценка состояния исследований в мире и затем объективная оценка своего вклада в развитие данного направления в разрезе отечественной и мировой науки. К тому же, многие из отечественных исследователей в последние годы публикуются в основном в международных журналах в связи с изменившимися акцентами в фондах, научных и образовательных организациях.

2. При обосновании недостатков и преимуществ традиционных и не традиционных способов конверсии твердых топлив целесообразно было использовать больше конкретных количественных оценок, так как за последние 3 года возникает довольно много дискуссий практически по каждой из рассмотренных в первой главе диссертации проблем.
3. В главе 1 достаточно подробно рассмотрены достижения отечественных научных школ в области газификации угольных топлив с указанием вклада ИТ СО РАН, КузГТУ, УрФУ, МЭИ и др. Целесообразно было привести такое же описание задела отечественных и зарубежных научных коллективов в области водосодержащих угольных суспензий. В 2014–2019 гг. по последнему направлению опубликованы более 100 статей отечественными специалистами в российских и международных журналах, несколько монографий, защищены 5–7 кандидатских и докторских диссертаций, получены несколько десятков патентов и свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.
4. При постановке задачи в уравнениях (2.11)–(2.13) учитывается крайне ограниченная группа сил, влияющих на движущиеся в топочном

пространстве частицы или капли топлива. Известно, что на последние при движении в топочном пространстве влияют силы поверхностного натяжения, тяжести и аэродинамического сопротивления, подъемной силы, вязкого трения, Магнуса, турбофореза, термофореза и др., а также группа факторов (несферичности, внутренней термогравитационной конвекции, турбулентности несущей среды, сжимаемости последней, концентрации дисперсной фазы, нестационарности движения, фазовых превращений и др.). Также важную роль играют столкновения частиц и капель с соседними в режимах коагуляции, фрагментации и измельчения. Целесообразно было обосновать рассмотрение только ограниченного перечня сил, факторов и эффектов с указанием вклада остальных в виде долей или процентах.

5. В п. 2.8 приведена весьма упрощенная модель воспламенения и горения водоугольного топлива. Факторы фильтрации, диспергирования, газофазного и гетерогенного зажигания требуют детального рассмотрения и описания. В ИТ СО РАН и ТПУ на протяжении 7–8 лет ведутся соответствующие исследования в рамках грантов РФФИ и РФИИ, публикуются совместные статьи (можно выделить труды Кузнецова Г.В., Саломатова В.В., Сыродоя С.В. и др.). Целесообразно было принять во внимание эти результаты или хотя бы прокомментировать при обосновании допущений. В целом в диссертации прослеживается стремление к укрупненному описанию объектов и процессов, но во многих случаях не обсуждаемые детали существенно меняют условия.
6. В главе 3 приведены результаты тестирования разработанной модели за счет сравнения с известными экспериментальными результатами. При объяснении отклонений не обсуждаются особенности и ограничения экспериментов, применяемые методы, погрешности и средства измерений, места их установки, характерная инерционность сенсоров и др. Указана только ссылка на соответствующие литературные источники. После изучения указанных разделов много вопросов остается по причинам рассогласований расчетов и экспериментов, а также, за счет чего удалось

достичь в целом удовлетворительной корреляции. Целесообразно было прокомментировать более подробно данные аспекты.

7. Глава 4 с основными результатами исследований выглядит крайне скромно в плане наполнения анализом перспектив созданной модели и объяснения полученных теоретических следствий и значений основных характеристик. На 24 страницах приведены результаты выполненных расчетов для двух установок без детального рассмотрения возможных режимов их работы, а также изучения масштабов влияния хотя бы основных факторов. Даже по названиям разделов возникают вопросы, которые остались без ответов. Например, почему решили рассматривать пути усовершенствования перспективного поточного газогенератора? Он является перспективным или нет, если планируется его совершенствование? При этом рассмотрен, по сути, один вариант совершенствования, а не несколько. По каким причинам решили рассмотреть котел с жидким шлакоудалением при сжигании водоугольного топлива? Не самый очевидный выбор для водосодержащих композиций. Целесообразно было соответствующие обоснования привести в начале главы, а затем представлять результаты моделирования и детально их анализировать.
8. Довольно странным выглядит одновременное использование двух единиц измерения температуры ($^{\circ}\text{C}$ и K), размеров (мм и м) и др. Это приводит к определенным сложностям прямого сопоставления результатов исследований, приведенных в разных частях диссертации и автореферата. В целом в теоретических диссертационных работах принято использовать единый список обозначений для правильного понимания всех символов и связей между ними, а также использованных сокращений, единиц измерений.

Сделанные замечания не снижают положительной оценки диссертационной работы В.А. Кузнецова. Считаю, что сформулированные замечания и вопросы помогут диссертанту в дальнейших исследованиях. В целом можно отметить большие перспективы дальнейших исследований, так

как по сути в диссертации приведены модели взаимосвязанных процессов тепло-массопереноса, фазовых превращений и химического реагирования при газификации и горении распыленного угольного топлива, т.е. существенно шире, чем обозначено в названии работы.

Тема диссертации В.А. Кузнецова «Математическое моделирование процессов тепло- и массообмена для перспективных технологий энергетического использования угольного топлива» соответствует паспорту специальности «01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника» (по части формулы специальности: «численное и натурное моделирование теплофизических процессов в природе, технике и эксперименте»; области исследований: «экспериментальные и теоретические исследования процессов взаимодействия интенсивных потоков энергии с веществом»), так как в диссертации приведены результаты моделирования процессов нагрева, газификации и сжигания угольных топлив. **По отрасли наук** диссертационная работа соответствует требованиям, предъявляемым к работам **на соискание ученой степени кандидата технических наук**, так как она направлена на разработку и применение методов повышения экологически эффективного использования угольных топлив.

Содержание автореферата в целом соответствует содержанию рукописи диссертации.

Результаты диссертационного исследования В.А. Кузнецова регулярно докладывались на научных конференциях различного уровня (в университетах и исследовательских центрах г. Новосибирска, Екатеринбурга, Санкт-Петербурга, Москвы, Алушты, Ялты и др., также имеется опыт представления результатов на международных конференциях высокого уровня) и публиковались в журналах, рекомендованных ВАК Министерства высшего образования и науки РФ для публикации материалов кандидатских и докторских диссертаций («Теплофизика и аэромеханика», «Ползуновский вестник», «Журнал сибирского федерального университета. Техника и технологии»).

На основании анализа содержания рукописи и автореферата диссертации В.А. Кузнецова можно сделать вывод о том, что диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (ред. от 01.10.2018), так как является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи, имеющей существенное значение для повышения экологической эффективности газификации угольных топлив и сжигания водоугольных суспензий в теплоэнергетических установках. Считаю, что Виктор Александрович Кузнецов заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника.

Доктор физико-математических наук, профессор
(01.04.14, физико-математические науки),
профессор Национального исследовательского
Томского политехнического университета
Стрижак Павел Александрович
(3822) 606-102
pavelspa@tpu.ru



Подпись П.А. Стрижака заверяю
Ученый секретарь Национа
исследовательского Томск
политехнического универси
Ананьева Ольга Афанасьев



Национальный исследовате
Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30
т. 8(3822), 701-777
<https://tpu.ru/>



15.03.2019

Присужден в совет 09.04.2019
Уч. секретарь Д.С. Буланова

с отзывом ознакомлен 12.04.19

 / Кузнецов В.А.