

ОТЗЫВ

**официального оппонента – доктора физико-математических наук,
доцента Лукьяненко Дмитрия Витальевича на диссертацию
Баденко Владислава Вадимовича
на тему «Разработка методов и вычислительных инструментов
для кинетического анализа и математического моделирования
термохимической конверсии биомассы
в гибридных энергетических системах»
по специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ
на соискание ученой степени кандидата технических наук.**

Диссертационная работа Баденко Владислава Вадимовича посвящена математическому моделированию, разработке численных методов и прикладного программного обеспечения для решения актуальной научно-технической проблемы – повышению эффективности термохимической конверсии биомассы для использования в гибридных энергосистемах децентрализованного электроснабжения.

Актуальность избранной темы. В условиях глобального энергоперехода и ужесточения экологических норм технологии переработки углеродсодержащих отходов в синтез-газ и другие энергоносители приобретают особую значимость. Однако существующие установки термохимической конверсии требуют совершенствования, что невозможно без углубленного изучения кинетики процессов и разработки точных математических моделей. Автором предложен комплексный подход, объединяющий модифицированный численный метод кинетического анализа, CFD-моделирование реактора и программные средства для мониторинга гибридной микросети. Такое сочетание методов полностью соответствует паспорту специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Тематика исследования является своевременной и востребованной как для фундаментальной науки, так и для практической энергетики.

Общая методология и методика исследований. В работе использован комплексный подход, сочетающий: инструментальные исследования, численные методы, экспериментальные исследования на лабораторном реакторе пиролиза и гибридной микросети, прикладное программирование. Такая методология позволила обеспечить взаимосвязь между данными термогравиметрии и масс-спектрометрии, кинетическими параметрами и прогнозным моделированием работы реального оборудования. Такой комплексный подход обеспечивает высокую достоверность и воспроизводимость результатов.

Степень обоснованности и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. Достоверность полученных результатов обеспечивается: применением высокоточного оборудования; воспроизводимостью экспериментальных данных (проведено несколько серий опытов, расхождения не превышают 3–5%); сопоставлением расчётных данных с литературными источниками и собственными экспериментами; статистической верификацией CFD-модели с использованием коэффициента детерминации R^2 (0,85–0,999) и критерия Фишера; использованием стандартизированных методов кинетического анализа для сравнения с предложенной модификацией. Выводы диссертации логично вытекают из представленных результатов и не вызывают сомнений.

Научная новизна полученных результатов. Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем.

1. Разработана модификация численного метода Коутса-Редферна, отличающаяся использованием расширенного набора входных данных (термический анализ и масс-спектрометрия) и заменой подынтегральной функции степени конверсии на промежуточную функцию, что позволяет рассчитывать кинетические параметры (энергию активации, предэкспоненциальный множитель) для реакций образования отдельных газообразных продуктов. В отличие от классических методов, оценивающих только обобщенную энергию активации, предложенный подход дает детальную информацию о кинетике каждой стадии.

2. Создана математическая модель реактора пиролиза биомассы на основе уравнений вычислительной гидродинамики, в которую впервые интегрированы кинетические параметры, полученные модифицированным методом Коутса-Редферна. Модель учитывает пористую структуру слоя, турбулентность и образование синтез-газа. Проведена верификация модели и показана её пригодность для оценочного прогнозирования.

3. Впервые получены экспериментальные данные о работе электрогенератора, адаптированного под низкокалорийный синтез-газ, в составе гибридной микросети с фотоэлектрическими преобразователями. Установлены диапазоны коэффициента избытка воздуха и электрического КПД.

4. Разработаны проблемно-ориентированные программные комплексы: для автоматизированной обработки данных с реализацией модифицированного метода Коутса-Редферна и для веб-мониторинга параметров гибридной микросети.

Ценность для науки и практики полученных автором результатов. Теоретическая значимость работы состоит в развитии методов кинетического

анализа твердых топлив за счёт учета нелинейных эффектов и корреляции с масс-спектрометрическими данными, а также в создании многомасштабной CFD-модели, связывающей микро-кинетику с макро-гидродинамикой реактора. Практическая значимость подтверждается: разработанным и зарегистрированным программным обеспечением для расчёта кинетических коэффициентов, внедрением системы мониторинга гибридной микросети в ИСЭМ СО РАН, возможностью использования CFD-модели для оптимизации режимов работы и масштабирования реакторов пиролиза.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации. Разработанный программный комплекс для кинетического анализа рекомендуется к использованию в лабораториях, занимающихся исследованием термохимической конверсии биомассы, углей и других твердых топлив. CFD-модель реактора пиролиза может быть применена проектными организациями для оптимизации конструкции слоевых газогенераторов и выбора режимных параметров (температура, скорость нагрева, размер частиц). Система мониторинга и полученные экспериментальные данные полезны при проектировании автономных гибридных энергосистем для удалённых и децентрализованных районов.

Общая оценка содержания диссертации и завершенность. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно на высоком уровне. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (179 наименований) и четырех приложений. Общий объем – 150 страниц, содержит 46 рисунков и 9 таблиц. Во введении обоснована актуальность, сформулированы цели, задачи, научная новизна и практическая значимость. В первой главе проведен обзор состояния проблемы, методов кинетического анализа, CFD-моделирования и гибридных энергосистем. Во второй главе описан модифицированный метод Коутса-Редферна, приведены результаты его верификации на примере пиролиза сосновых опилок при различных скоростях нагрева и размерах частиц. В третьей главе представлена CFD-модель реактора пиролиза, включая построение расчетной сетки, выбор кинетической модели, результаты вычислительных экспериментов и их сопоставление с опытными данными. В четвертой главе описана гибридная микросеть (солнечные панели + газогенератор), проведены экспериментальные исследования работы генератора на пропан-бутановой смеси и синтез-газе, разработана система мониторинга. Заключение содержит основные результаты и обсуждение перспектив дальнейших исследований. Содержание диссертации полностью соответствует паспорту специальности 1.2.2 (в части пунктов 3, 4, 9 этой специальности).

Список замечаний по недостаткам в содержании и оформлении диссертации соискателя и прилагаемого к ней автореферата. По итогам анализа работы можно сделать следующие замечания, которые не снижают общей высокой оценки работы и носят преимущественно рекомендательный и дискуссионный характер.

1. **Отсутствует обсуждение регуляризирующих свойств предложенного в Главе 2 метода.** В параграфе 2.1 «Описание классического метода Коутса-Редферна и постановка обратной задачи кинетики» на стр. 59 делается акцент на том, что «обратная задача в контексте термохимической конверсии не является корректной» и для неё нарушаются второе и третье условие корректности математической постановки задачи по Адамару. Это утверждение предполагает, что для её решения необходимо использовать какой-либо регуляризирующий алгоритм. В том числе предполагается, что это утверждение переносится и на модифицированный метод, который выносится на защиту. Однако далее, в параграфе 2.2 «Описание и верификация модифицированного метода Коутса-Редферна», при описании защищаемого метода решение соответствующих проблем некорректности постановки не обсуждается. Необходимо пояснить важность наличия соответствующих обсуждений. В основе предложенного метода лежит уравнение (2.14), которое содержит две неизвестные — параметры A и E_α . Эти две неизвестные могут быть найдены из как минимум двух уравнений, которые соответствуют двум различным экспериментам. Из контекста изложение материала диссертационной работы следует, что различным экспериментам соответствуют различные условия проведения эксперимента — скорости нагрева β . Сразу надо отметить, что этот момент следовало бы формализовать более явно, — в виде системы уравнений, в которой содержались бы значения β_k для $k=1, \dots, K$. Из дальнейшего текста работы (начиная со стр. 66) следует, что $K=4$, т. е. используются экспериментальные данные для четырёх скоростей нагрева. С учётом экспериментальных ошибок во входных данных это приводит к тому, что соответствующая задача по определению параметров A и E_α не имеет классического решения. В подобных ситуациях принято использовать метод наименьших квадратов, который позволяет найти псевдорешение. Но этот момент не формализован в работе. В связи с этим, это может запутать потенциального читателя, у которого могут возникнуть следующий вопрос. На стр. 59 было сказано, что у рассматриваемой обратной задачи существует решение. Это следует и для модифицированной задачи (см. формулы (2.15) и (2.16)) в случае использования метода наименьших квадратов. Но если метод наименьших квадратов не использовался, то это нет так — для различных β_k будут

получаться различные значения искомым неизвестных (при этом это не относится к нарушению второго условия корректности постановки задачи по Адамару). Как же автор диссертационного исследования находил соответствующие неизвестные? Далее необходимо отметить, что указанные формулы не учитывают ошибки ни в экспериментальных измерениях ионного тока, ни ошибки в модели (сделанные допущения, в частности, про допустимый порядок реакции n). Возникает следующий вопрос, связанный с некорректностью постановки задачи, — как из этих формул следует упомянутое ранее нарушение третьего условия корректности по Адамару (устойчивость решения по отношению к ошибкам входных данных)? Из приведённых формул следует, что решаемая задача в этом смысле является корректной — при экспериментальных ошибках стремящихся к нулю точки, через которые проводится определяемая законом (2.14) аппроксимирующая прямая, будут стремиться расположиться на одной прямой. Как следствие, приближённое решение (псевдорешение) будет стремиться к точному. Таким образом, возникает фундаментальный вопрос — всё же решаемая задача является корректно поставленной или некорректно поставленной в смысле третьего условия корректности по Адамару? В первом случае возможна оценка погрешности восстановленного решения (в работе она отсутствует). Во втором случае оценка погрешности невозможна, но само решение задачи требует использование регуляризирующего алгоритма, в котором выбор параметра регуляризации согласуется с погрешностью экспериментальных данных и ошибкой оператора задачи (описание этой процедуры в работе тоже отсутствует).

2. Отсутствует обсуждение влияния ошибок модели и ошибок в экспериментальных данных на полученное решение. Как было отмечено в замечании 1, оценки соответствующих ошибок важны как при решении корректной задачи (они позволяют оценить погрешность полученного приближённого решения), так и при решении некорректной задачи (они позволяют построить обоснованный регуляризирующий алгоритм решения). Некоторые соответствующие недостатки перечисляются далее.

2.1. Одними из входных данных модифицированного метода являются зависимость ионного тока от температуры для исследуемого компонента и газа-носителя. Измерения этих двух функций проводились совместно или отдельно? Из контекста работы следует, что эти измерения проводились отдельно, т.е. функции известны из эксперимента в виде набора сеточных значений на разных сетках значений температуры. Численное вычисление интеграла в (2.7) в этом случае предполагает интерполирование значений одной из функций на сетку, на которой определена другая функция. Но в

случае интерполяции, как хорошо известно, теряется информация, или, если говорить формально, вносится дополнительная ошибка в данные. Из работы не понятно, учитывалась ли как-нибудь эта ошибка.

2.2. Являются ли формулы для оценки погрешностей (2.11) и (2.12) конструктивными в контексте диссертационного исследования или приведены формально? Указанные формулы являются формулами для априорной асимптотически точной оценки погрешности и обычно играют теоретическую роль. На практике их использовать зачастую невозможно, так как в них входит оценка максимального значения производной функции, которая не известна. Не понятно учитывалась ли как-нибудь ошибка, вносимая в модель задачи за счёт использования этих формул.

2.3. Какова мотивация использования метода скользящего среднего (см. стр. 65), если применение этого метода приводит к потере информации, т.е. внесению дополнительной ошибки в экспериментальные данные? Не обсуждается выбор ширины окна (3 точки) и проверка того, что при этом не теряются значимые особенности кинетических кривых. Рекомендуется в будущих работах проводить сравнение с более надёжными методами сглаживания (вейвлет-фильтрация, регуляризация А.Н. Тихонова).

3. Присутствуют противоречия в обозначениях. Например, на стр. 63 функция $F(T)$ вводится, как массив данных, содержащий значения для каждого шага численного интегрирования интеграла в формуле (2.7). Отсюда следует, что $F(T)$ является безразмерной величиной, так как подынтегральная функция (сеточные значения которой используются для численного интегрирования) является отношением двух одинаковых физических величин — ионных токов. Однако с учётом последующих пояснений потенциальный читатель будет воспринимать эту функцию, как функцию определяемую формулой (2.7), в которой как раз присутствует упомянутый интеграл. В этом случае размерность этой величины будет [л/г]. Но уже спустя две страницы (см. стр. 65) упоминается, что функция $F(T)$ имеет размерность [масса/заряд].

Необходимо повторить, что указанные замечания не снижают общей высокой оценки работы и носят преимущественно рекомендательный и дискуссионный характер.

Соответствие содержания автореферата содержанию диссертации. Автореферат полностью отражает структуру и основные результаты диссертационной работы. В нем корректно представлены цели, задачи, научная новизна, практическая значимость, положения, выносимые на защиту. Приведенные в автореферате рисунки и таблицы соответствуют таковым в диссертации. В целом, автореферат дает адекватное представление о работе.

Таким образом, диссертация Баденко Владислава Вадимовича является научно-квалификационной работой, соответствующей критериям пунктов 9 – 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 (с изменениями и дополнениями), в которой содержится решение актуальной научно-технической задачи по созданию новых численных методов и программных комплексов для кинетического анализа и CFD-моделирования процессов пиролиза биомассы, имеющей значение для развития математического моделирования в приложении к проблеме четвертого энергоперехода и декарбонизации экономики, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата наук.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, доцент

Л. О.

28 мая 2026 г.

Д.В. Лукьяненко

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», физический факультет, отделение прикладной математики, кафедра математики, профессор

Контактные данные:

тел.: +7(495) 939-10-33, e-mail: lukyanenkodv@my.msu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Адрес места работы:

119992, г. Москва, Ленинские горы 1, стр. 2, физический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Тел.: +7 (495) 939-31-60; e-mail: info.ff@org.msu.ru

В.В. Белокуров

В.В. Белокуров

