

ОТЗЫВ

доктора технических наук исполняющего обязанности директора ИНЭИ РАН Кейко Александра Владимировича на автореферат диссертации Баденко Владислава Вадимовича «Разработка методов и вычислительных инструментов для кинетического анализа и математического моделирования термохимической конверсии биомассы в гибридных энергетических системах», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2 (Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ)

Диссертационная работа В.В. Баденко посвящена разработке методов и программных инструментов для моделирования термохимической конверсии (ТХК) биомассы и их интеграции в гибридные микроэнергосистемы. При обосновании актуальности соискатель приводит аргументы в пользу особой значимости технологий термохимической конверсии в современных условиях. В числе указанных аргументов он приводит четыре, а именно: экологическую значимость, энергетическую эффективность, экономическую целесообразность и необходимость оптимизации процессов. Можно согласиться с тремя первыми аргументами, тогда как необходимость «углубленного изучения кинетики процессов и разработки точных математических моделей» едва ли можно отнести к факторам, повышающим значимость технологий. Оставим эту маленькую натяжку на совести соискателя.

В первой главе диссертации описана энергосистема, реализованная в лабораторном масштабе в составе фотоэлектрических преобразователей и газогенератора (ЛЭС). В рамках диссертационного исследования разработана информационная система, предназначенная для мониторинга и анализа характеристик ЛЭС с целью согласования их работы и повышения эффективности ЛЭС в целом. Задача создания автоматизированных систем управления для систем автономного энергоснабжения, использующих растительную биомассу, действительно весьма актуальна. Как было показано в трудах научных предшественников соискателя в конце нулевых годов, это связано с экономикой энергоисточников на биомассе: ограничение их единичной мощности, продиктованное низкой плотностью исходного топлива по территории и сравнительно высокой стоимостью его сбора и кондиционирования, вынуждает стремиться к безлюдным режимам эксплуатации таких источников. Возможность интеграции энергоисточников на биомассе в состав энергетических комплексов, сочетающих их работу с использованием других источников возобновляемой энергии, особенно фотоэлектрических и ветряных, представляет собой еще больший вызов. Действительно, несмотря на наличие коммерчески доступных контроллеров, способных обеспечить низовое аппаратное управление в таких комплексах, требуется разработать специальные алгоритмы прогнозирования режимов их работы. Только в этом случае возможно обеспечить требуемый уровень их надежности. По этим причинам тематика исследования является актуальной.

Отличительной чертой диссертационного исследования В.В. Баденко является глубокое погружение в проблематику термохимической конверсии вплоть до экспериментальной кинетики гетерофазных химических процессов. Этому посвящена вторая глава диссертации.

Целью работы заявлены: (а) разработка численного метода для кинетического анализа; (б) построение математической модели ТХК на основе пакета вычислительной гидродинамики; и (в) интеграция разработанных модели и метода в комплексы программ, связанные с установками генерации энергии из возобновляемых источников. Следует признать, что цель сформулирована не вполне внятно по следующим причинам.

Во-первых, кинетический анализ предполагает определение и рассмотрение характеристик скорости химических реакций, таких как стерические факторы, энергия активации и пр. Численный метод, по определению, это алгоритмический способ приближенных вычислений (в противовес аналитическим методам). Методы типа упомянутых по тексту Озавы-Флинна-Уолла, Фридмана, Киссинджера и др. принято называть методами кинетического анализа, но они не относятся к численным методам в терминологии вычислительной математики. Они сводятся к преобразованиям данных и построению удобных для интерпретации линейных зависимостей. Что делает метод численным – если он организован через численные процедуры, такие как итерационная оптимизация параметров, аппроксимация интегралов без аналитического решения и т.п. Озава-Флинн-Уолл – это графические и аналитические приемы. Классический Коутс-Редферн – это приближенная формула в аналитическом виде. Таким образом, само словосочетание «численный метод для кинетического анализа» либо содержит явную натяжку, либо не отражает фактической сущности исследования. В том же Коутсе-Редферне можно применить метод, при котором константу Аррениуса или энергию активации отыскивают итерационным перебором в ходе оптимизации. Тогда этот метод справедливо отнести к численным, обосновать его сходимость и контроль погрешности.

Во-вторых, комплекс программ предназначен для управления либо мониторинга энергоустановок на основе ВИЭ. Если интеграция модели ТХК в систему управления установкой не вызывает сомнений в целесообразности, то совершенно непонятно, зачем в этот комплекс интегрировать метод определения кинетических констант. Да, они могут потребоваться при разработке модели ТХК, однако на этапе управления конкретной установкой модель уже не предполагает дальнейших изменений. Даже модернизация системы управления будет предполагать только замену модели ТХК целиком, но никак не измерения с использованием ТГА-МС.

В качестве замечаний необходимо отметить следующее.

1. На стр. 17 автореферата при описании модели реактора ТХК соискатель сообщает, что для описания химических процессов в реакторе он использовал «обобщенную кинетическую реакцию» (реакция 4), исходными реагентами которой выступают топливо и воздух. Других реакций модель не

использует. В условиях пиролиза скорость указанной реакции должна стать равной нулю. Модель в изложенной постановке не может описывать случай чистого пиролиза. Представленные экспериментальные результаты демонстрируют, что кислородсодержащие компоненты сохраняются в продукт-газе на протяжении более 5000 сек. Следовательно, можно предположить, что в реакторе был реализован процесс не пиролиза, а газификации. Тем не менее, по тексту работы реактор именуется реактором пиролиза, а на представленной схеме (рис. 4) показан реактор, не имеющий входа для подачи дутьевого агента. Получается, что эксперименты выполнены на одном реакторе с одним процессом ТХК, а модель построена для конструктивно другого реактора с другим процессом ТХК. Тогда становится совершенно непонятно, каким образом на рис. 5 получены расчетные концентрации – они получены не с помощью описанной модели, а с использованием какого-то другого инструмента?

2. Если в реакторе, описанном в главе третьей, был организован именно пиролиз (с момента 500 сек. сумма концентраций CO , CO_2 , CH_4 и H_2 дает 100%), то выход газа через час от начала эксперимента должен был стать микроскопическим. К сожалению, выход газа в работе не указан. Тогда гладкость кривых с момента 2000 сек. указывает на завершение выхода летучих. Имеем классическую картину: как и в моделях горения Н.В. Лаврова и Б.В. Канторовича конца 1950-х годов, простая модель точно описывает процесс, в котором топливом служит древесный уголь (идеальное твердое топливо), и заметно отклоняется на более ранних стадиях. Следовательно, оценивать качество модели следует по отрезку до 2000 сек. При этом модель неприменима для описания чистого пиролиза (см. замечание 1). Получается, что помимо реакции 4 в модели реактора была использована еще какая-то реакция, либо просто другая реакция. Из этого с неизбежностью следует, что в любом случае модель описана некорректно.

3. Аналогичное замечание относится и к начальному отрезку графиков на рис. 5 (стр. 19 автореферата). Не вполне ясно, в какой момент была включена система регистрации измерений. Если реактор нагревали со скоростью 10 К/мин (так сказано по тексту), то зажигание реакции должно было произойти лишь через 23-25 минут (порядка 1500 сек.) от начала нагрева – по условию температуры зажигания лигноцеллюлозных материалов (270-275 °С). Температура в реакторе в работе также не отражена. На рисунке же водород и монооксид углерода в продукт-газе регистрируются уже от начала измерений. Появление CO_2 при прогреве и сушке топлива еще можно было бы объяснить его десорбцией, но применительно к компонентам синтез-газа это необъяснимо.

4. При описании тепломассопереноса в слое топлива (стр. 16-18 автореферата) соискатель использует постоянные значения плотности и теплопроводности, а при описании теплопередачи к стенке – уравнение Пуассона для гомогенной и изотропной среды. Однако в описываемом реакторе организован периодический процесс, при котором древесина усаживается, растрескивается, карбонизируется (превращается в уголь) и

крошится. Более того, размер реактора не позволяет пренебречь радиальной неоднородностью слоя. Теплопроводность и излучательная способность угля в разы отличаются от таковых для древесины. То же можно сказать и о порозности слоя, которая по мере карбонизации топлива возрастает. В этих условиях Ansys Fluent может выдать гладкие кривые и стабильную динамику даже с постоянными коэффициентами, но никогда не воспроизведет экспериментальную кривую. Не в этом ли кроется причина расхождений на стадии внутреннего горения (участок от 500 до 1800 сек. на рис. 5)?

5. Ни из текста автореферата, ни из текста диссертации неясно, как устроен и как работает газогенератор в составе ЛЭС. Не указаны тип процесса ТХК, производительность аппарата, его маневренные характеристики. Нет информации о системе промежуточного накопления синтез-газа. Четвертая глава диссертации не содержит четкой постановки задачи. Эффективность работы ЛЭС оценивали по показателю КПД, для расчета которого использовали только данные о расходе и калорийности газа. Баланс энергии для ЛЭС за определенный период времени в работе не представлен, что является существенным недочетом работы. Как результат, выводы к четвертой главе оказались малосодержательными, а в части утверждений относительно оптимальных режимов работы газогенератора – безосновательными.

6. В работе не приведены данные о характеристиках электрической нагрузки, которую обеспечивала ЛЭС. Имеющихся в работе сведений о ЛЭС недостаточно, чтобы оценить показатели нагрузки ее отдельных компонентов (газогенератора, двигатель-генератора, аккумулятора и ФЭП). В двух крайних случаях возможно, что в составе ЛЭС оказывается бесполезным либо газогенераторный блок, либо солнечный. Сам соискатель такого анализа не выполнил. При столь высокой неопределенности четвертая глава не содержит полезных сведений для проектирования либо оптимизации гибридных энергокомплексов.

Подводя итог сделанным замечаниям, можно резюмировать, что текст диссертации изложен более последовательно, чем текст автореферата. При обосновании актуальности своего исследования соискатель отметил экологическую значимость, энергетическую эффективность, экономическую целесообразность технологий тепловой биоэнергетики и необходимость оптимизации процессов ТХК. Наибольшее продвижение в работе достигнуто в части кинетического анализа, тогда как в перечисленных составляющих актуальности продвижение не выглядит убедительным.

Несмотря на сделанные замечания, необходимо отметить, что работа выполнена научно, на современной приборной и информационной базе, с элементом здоровой научной любознательности. Не вызывает сомнений личный вклад автора в полученные результаты. Предложены несколько методов, развитие которых способно внести вклад в понимание того, как должны быть организованы гибридные энергосистемы на базе возобновляемых источников энергии для нужд децентрализованного энергоснабжения. Работа представляет собой завершенное квалификационное исследование и соответствует заявленной специальности 1.2.2 –

Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, а также требованиям пунктов 9–14 Положения о присуждении ученых степеней. Ее автор, В.В. Баденко, бесспорно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук.

Кейко Александр Владимирович, доктор технических наук, исполняющий обязанности директора, ФГБУН Институт энергетических исследований Российской академии наук. Почтовый адрес: 117186 г. Москва, ул. Нагорная, д. 31, корп. 2.

06 июня 2026 года

Доктор технических наук, исполняющий обязанности директора ИНЭИ РАН
Кейко Александр Владимирович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
энергетических исследований Российской академии наук
117186, г. Москва, ул. Нагорная, д.31, корп.2
Телефон: + 7 (499) 127-46-64
Адрес электронной почты: info@eriras.ru

