

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Казаринова Артёма Витальевича «Многофакторный анализ эффективности технологических процессов производства водорода» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

Актуальность темы исследования

В современных условиях энергетического перехода к низкоуглеродным источникам энергии и усиления требований к снижению углеродного следа ключевым направлением развития мировой промышленности становится производство водорода как универсального энергоносителя и химического сырья. Обеспечение его получения с минимальными выбросами углерода является стратегической задачей технологической политики ведущих промышленных стран, включая Российскую Федерацию. В этой связи актуальной становится задача поиска и системной оценки технологических решений, обеспечивающих экологически чистое и экономически целесообразное производство водорода.

Диссертационная работа Казаринова Артёма Витальевича направлена на решение актуальной научно-технической проблемы – разработку и применение методов системного анализа для оценки эффективности процессов производства водорода, прежде всего каталитического пиролиза метана. В современных условиях усложнения технологических систем и необходимости учёта совокупности технологических, экономических и экологических факторов использование системного подхода и аппарата многокритериального анализа (в частности, DEA-методов, статистического анализа и инструментов математического программирования) представляется методологически обоснованным и практически значимым.

Тематика исследования и применённый научный аппарат полностью соответствуют области исследований по специальности 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» и отвечают современным приоритетам научно-технического развития Российской Федерации.

Степень разработанности и обоснованности темы

Проведённый анализ научных публикаций и отраслевых отчётов показывает, что проблематика повышения эффективности низкоуглеродных технологий получения водорода активно развивается, однако большинство исследований ограничивается физико-химическим и инженерным анализом и не обеспечивает целостного системного представления. Недостаточно разработаны методы комплексной количественной оценки, позволяющие

с отзывом ознакомлен 08.12.2025
Казаринов А.В.

ОГБОУ ВО "СамГТУ"

08.12.2025

Вход. № 8/4

сопоставлять различные технологии по совокупности технологических, энергетических, экономических и экологических параметров.

В диссертации показано, что существующие подходы не решают задачу интегрального анализа эффективности и масштабируемости процессов производства водорода, что обуславливает необходимость применения принципов системного анализа. Такой подход обеспечивает обоснованный выбор темы работы, позволяющей исследовать процесс пиролиза метана как многофакторную систему с взаимосвязанными параметрами.

На основе всестороннего анализа отечественных и зарубежных источников, включая базы данных и аналитические отчёты Международного энергетического агентства (МЭА), обоснован выбор пиролиза метана в газофазной и жидкометаллической средах в качестве объекта исследования. Аргументирована необходимость разработки единой методики системного анализа и DEA-оценки, позволяющей увязать технологические параметры, ресурсоёмкость и производственные результаты в единую систему количественного сопоставления.

Таким образом, диссертационная работа базируется на глубоких теоретических предпосылках и отражает высокий уровень обоснованности темы, обеспечивающий достоверность постановки цели и выбора методов исследования.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, определены объект и предмет, указаны элементы научной новизны и практической значимости. Автор точно обозначает границы диссертационного исследования.

В первой главе выполнен всесторонний обзор современного состояния технологической базы производства водорода. Рассмотрены основные способы производства водорода: паровой риформинг, электролиз, пиролиз и др. Особое внимание уделено сравнению технологий проведения пиролиза метана в газофазной и жидкометаллической средах. Автор системно анализирует промышленные и исследовательские проекты, представленные в базе МЭА, что позволяет выявить тенденции развития водородной энергетики и технологические барьеры, возникающие из-за несовершенства или незрелости технологий. Сделан обоснованный вывод о том, что пиролиз метана сочетает множество преимуществ, в том числе высокий потенциал декарбонизации и экономическую целесообразность, что предопределяет выбор объекта исследования.

Во второй главе изложены методические основы многофакторного системного анализа процесса каталитического пиролиза. Представлено

структурно-функциональное описание процесса, определено множество его ключевых показателей. Проведён статистический анализ экспериментальных исходных данных, что позволило устранить признаки мультиколлинеарности и сформировать наборы входных и выходных параметров для обеспечения корректного применения DEA-анализа, направленного на количественную оценку эффективности. Обоснован выбор ориентированных на вход моделей DEA метода для постановки задачи математического программирования как наиболее адекватных для задач снижения ресурсных затрат при сохранении выхода продукта. При этом показано, что неориентированные модели целесообразно использовать при выявлении резервов повышения эффективности. Приведено подробное описание и проведен сравнительный анализ моделей CCR, BCC, SBM и Super-Efficiency, а также указаны особенности их применения для анализа сложных технологических процессов.

Во второй главе сформулирована задача системного анализа технологического процесса пиролиза метана и предложена методика её решения, основанная на последовательном выполнении двенадцати этапов, объединённых в три взаимосвязанных блока. Первый блок направлен на структурно-функциональное описание процесса и анализ его подсистем, что обеспечивает целостное представление о технологической схеме. Второй блок охватывает технико-экономическую и экологическую оценку, позволяющую выявить ключевые показатели, определяющие эффективность функционирования процесса. Третий блок предназначен для интеграции собранных данных и проведения многофакторной DEA-оценки, включающей статистическую обработку информации и выработку обоснованных решений по оптимизации и масштабированию технологии.

Предложенная методика отличается целостностью и логической завершённостью, сочетает системный и количественный подходы, предусматривает учёт деградации катализатора во времени и возможность итеративного уточнения параметров. Разработанный подход обладает универсальным характером и может быть адаптирован для анализа эффективности других химико-технологических и энергетических систем, что расширяет его научное и практическое значение. Глава характеризуется методической строгостью и демонстрирует владение автором современными средствами системного анализа сложных технологических процессов.

Третья глава содержит детальное описание разработанного алгоритма многофакторного анализа технологий пиролиза метана, основанного на комплексе моделей метода DEA, включающем: модель CCR для оценки общей эффективности при постоянной отдаче от масштаба, модель BCC для определения чистой технической эффективности при переменной отдаче, модель SEFF для ранжирования объектов по уровню эффективности и модель SBM для количественной оценки резервов входных и выходных параметров.

Алгоритм апробирован на задаче анализа экспериментальных данных, полученных в лаборатории СамГТУ на установках каталитического пиролиза метана с использованием девяти типов катализаторов различного состава и температур приготовления, что обеспечило репрезентативность выборки и достоверность последующих оценок. На основе CCR и VCC-моделей выявлены эталонные эксперименты и определены резервы улучшения параметров для неэффективных режимов. Модель Super-Efficiency позволила провести количественное ранжирование катализаторов, находящихся на границе эффективности, и выявить скрытые различия между близкими по оценкам катализаторами с различными компонентными составами. Использование SBM-модели обеспечило количественную оценку индивидуальных резервов для каждого параметра: например, возможности снижения расхода электроэнергии при сохранении уровня выхода водорода или уменьшения себестоимости при фиксированных технологических условиях.

В результате анализа показано, что газофазный пиролиз метана в заданных технологических режимах демонстрирует более высокую совокупную эффективность по сравнению с жидкометаллическим, однако последний имеет свои преимущества и требует дополнительных исследований. Автор корректно интерпретирует эти различия, связывая их с особенностями теплообмена и каталиторных систем.

Особое внимание в работе уделено оценке влияния состава катализаторов на эффективность процесса пиролиза. Проведённый анализ позволил выявить наиболее результативные каталитические системы и установить закономерности влияния содержания меди в никель-медных катализаторах на показатели конверсии и выхода водорода. Показано, что высокая стоимость катализатора не является определяющим фактором его эффективности, что подчёркивает необходимость многофакторного подхода к оценке технологических решений. Для каждого состава катализатора рассчитаны относительные резервы снижения затрат и увеличения выхода целевого продукта, что убедительно демонстрирует потенциал метода DEA для решения задач технологической оптимизации.

Дополнительно проведён анализ масштабного эффекта, позволивший определить оптимальные направления увеличения производительности без потери эффективности. Показано, что для большинства катализаторов наблюдается возрастающий эффект масштаба, что подтверждает перспективность перехода от лабораторных установок к пилотным.

В главе подробно описывается разработанный способ построения матрицы принятия решений, которая интегрирует оценки эффективности и эффектов масштабирования, что позволяет выявлять резервы и возможности совершенствования технологических режимов для принятия обоснованных решений по направлениям дальнейшей оптимизации и промышленному внедрению процессов. Предложенный способ объединяет теоретический инструментальный математического анализа и прикладные средства его инженерной интерпретации.

Глава завершается анализом экономической эффективности предложенных технологических и управленческих решений, подтвердившим существенный потенциал их практического внедрения. Показано, что применение матрицы решений позволяет выявлять и устранять источники неэффективности.

Четвёртая глава посвящена программной реализации предложенных решений. Автор описывает архитектуру программного комплекса **Methane Pyrolysis DEA Studio (MPDS)**, включающего модули ввода данных, расчёта, визуализации и анализа результатов. Проведена верификация вычислительных процедур с использованием пакета **MaxDEA**, подтвердившая корректность их реализации. Предложена концепция СППР, в которой разработанное программное обеспечение выполняет роль расчётного ядра, интегрируя результаты DEA-анализа в процесс формирования управленческих и технологических решений. Такое решение демонстрирует высокий уровень практической ориентации исследования и обеспечивает переход от аналитических расчётов к инструментам инженерного планирования и управления технологическими системами. Разработанный программный комплекс представляет собой практический инструмент поддержки принятия решений и может быть использован в исследовательской и учебной деятельности.

Научная новизна и практическая значимость

К числу наиболее значимых научных результатов относятся:

- разработка методики системного анализа процессов пиролиза метана, обеспечивающей комплексное рассмотрение технологических, энергетических, экономических и экологических факторов;
- алгоритм многофакторного DEA-анализа эффективности режимов каталитического пиролиза метана и компонентных составов катализаторов, позволяющего количественно оценивать эффективность и выявлять скрытые резервы улучшения ключевых параметров, влияющих на эффективность;
- способ оценки потенциала масштабирования технологий пиролиза метана, обеспечивающего выявление возможных и наиболее перспективных направлений перехода от лабораторных к промышленным условиям;
- способ формирования матрицы принятия решений для определения направлений оптимизации технологических параметров и выбора катализаторов, служащей инструментом поддержки инженерных и управленческих решений в области водородных технологий.

Практическая значимость работы подтверждается возможностью применения разработанных подходов при определении направлений

исследований, исследовании потенциала масштабирования и проектировании реакторов пиролиза, выборе катализаторов и расчёте технико-экономических показателей низкоуглеродного водорода. Результаты внедрены в научно-исследовательскую деятельность и учебный процесс, что документально подтверждено актами. Представленные результаты расчетов подтверждают практическую значимость проведённой работы и её соответствие современным направлениям развития водородной энергетики и системного анализа сложных технологических процессов.

Представленные акты внедрения подтверждают прикладной характер и практическую значимость результатов диссертационной работы.

Достоверность и обоснованность результатов

Достоверность и обоснованность полученных научных результатов обеспечиваются:

- использованием корректного математического аппарата системного анализа, статистических методов и моделей DEA;
- верификацией расчётов с применением независимого программного пакета MaxDEA, подтвердившей корректность алгоритмов;
- достаточным объёмом и репрезентативностью экспериментальных данных, полученных на лабораторных установках СамГТУ;
- логической согласованностью этапов исследования и корректной интерпретацией результатов.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, что подтверждает его научную обоснованность, актуальность и соответствие приоритетным направлениям научно-технического развития страны. Полученные выводы отличаются внутренней логической согласованностью, количественной обоснованностью и высокой степенью достоверности.

Замечания по работе

1. В первой главе при характеристике химико-технологических основ водородной энергетики отдельные термины требуют уточнения. Не всегда достаточно чётко прослеживается термодинамическая аргументация преимуществ технологий и описание механизмов пиролиза метана. Было бы полезно более ясно разграничить каталитические, плазменные и термические процессы, обозначив их энергетические барьеры и кинетические особенности.
2. В работе убедительно показана возможность использования DEA-методики для анализа технологических процессов. Вместе с тем представляет интерес обсуждение масштабирования методики на уровне технологических цепочек, например, связки «реактор–энергоблок–очистка–обращение с продуктами процесса», что позволило

бы оценивать эффективность не отдельных режимов, а комплекса взаимосвязанных подсистем технологии пиролиза метана.

3. При описании методики хотелось бы чуть подробнее понять, как именно интегрируется статистический анализ с DEA-подходом: каким образом результаты корреляционного анализа (в частности, по коэффициентам Спирмена) использованы при формировании исходных данных для формулировки задач математического программирования. Это сделало бы методическую часть более ясной и завершённой.
4. В исследовании количественно оценены показатели эффективности, однако остаётся открытым вопрос влияния неопределённости экспериментальных данных (например, разброса измерений или неточности в определении состава катализатора) на итоговые рейтинги DEA. Проведение анализа устойчивости результатов при варьировании исходных данных повысило бы достоверность выводов.
5. Экономическая часть исследования могла бы быть усилена сценарием вариативного анализа, например, при изменении рыночных цен на энергоносители, катализаторы и углеродные продукты. Это усилило бы прикладной аспект и позволило бы использовать результаты для прогнозных оценок и планирования.
6. Местами текст диссертации кажется перегруженным деталями, некоторое сокращение материалов описательного характера позволило бы сделать основное изложение более компактным и концентрированным на содержательных результатах. Кроме того, в тексте встречаются опечатки и единичные повторения, которые, однако, не влияют на содержание.

Отмеченные замечания не являются принципиальными и не снижают научной и практической ценности диссертационного исследования.

Общая оценка и вывод

Диссертационная работа Казаринова Артёма Витальевича «Многофакторный анализ эффективности технологических процессов производства водорода» является завершённым исследованием, в котором предложено оригинальное решение актуальной научно-практической задачи. Автор продемонстрировал высокий уровень теоретической подготовки, владение современными методами системного анализа, статистики и математическим аппаратом DEA анализа, а также способность к интеграции аналитических методов с инженерными задачами химико-технологического профиля.

Результаты прошли апробацию на конференциях и опубликованы в 9 научных работах, 5 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 4 – в прочих изданиях. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

По актуальности, степени научной проработанности, достоверности и практической значимости полученных результатов диссертация соответствует требованиям, установленным Положением о присуждении учёных степеней (утв. Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, в действующей редакции), а её автор, Казаринов Артём Витальевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

Официальный оппонент:

к.т.н., начальник центра инновационных
газохимических технологий
ООО «Газпром ВНИИГАЗ»



Михайлов Андрей Михайлович

«21» ноября 2025 г.

Кандидатская диссертация защищена по специальностям 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) и 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов (на дату защиты 2014 г.)

Подпись Михайлова А.М. заверяю:

*Зам. начальника
отдела*



Викторина SR

Общество с ограниченной ответственностью «Газпром ВНИИГАЗ»
195112, г. Санкт-Петербург, вн.тер.г. муниципальный округ Малая Охта, пр-кт Малоохтинский, д. 45, литера А, помещ. 2-Н, офис 812
Телефон: +7 812 704-01-01
Электронная почта: vniigaz@vniigaz.gazprom.ru
ОГРН 1025000651598
ИНН 5003028155