

УТВЕРЖДАЮ
Проректор
Московского государственного
университета
имени М.В. Ломоносова,
профессор РАН, д.ф.-м.н.
А.А. Федянин



«24» апреля 2025 г.

**Отзыв ведущей организации на диссертацию
АХУНЬЯНОВА Артура Ринатовича
на тему: «Влияние продуктов газификации биомассы и процесса
образования сажи на конверсию метана в синтез-газ», представленной на
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 1.3.17 — химическая физика, горение и взрыв, физика
экстремальных состояний вещества**

Исследование процесса конверсии метана в синтез-газ (смесь водорода и монооксида углерода) в настоящее время актуально по нескольким причинам. С точки зрения энергетической эффективности и экологии синтез-газ может служить экологически чистым топливом и эффективным источником энергии. Сжигание ископаемых топлив (ИТ) всегда приводит к образованию вредных выбросов, таких как основной парниковый газ CO_2 и твердые углеродные частицы. При использовании низкокалорийных топлив, таких как бурые угли, количество вредных выбросов возрастает. Поэтому широко обсуждается возможность получения из этих топлив синтез-газа и его дальнейшее использование в качестве более экологически чистого топлива и сырья для производства жидкого метанола и других полезных продуктов.

В ряде стран значительное внимание уделяется возобновляемым источникам энергии, в частности, получаемым из биомассы, ресурсы которой превышают доступные в этих странах запасы ИТ. Поиск альтернатив ИТ является ключевым для снижения выбросов парниковых газов и борьбы с изменением климата. Биомасса, как возобновляемый источник энергии, имеет потенциал уменьшить зависимость от ИТ. Конверсия биомассы в синтез-газ

позволяет производить биотопливо и другие химические продукты с более низким уровнем выбросов углекислого газа.

В диссертации Ахуньянова А.Р. исследовались кинетические закономерности конверсии метана в синтез-газ в кислородной и бескислородной среде с добавками (H_2O , CO , CO_2 , H_2) с учетом образования микрогетерогенных частиц сажи. С использованием обновленного единого кинетического механизма сажеобразования (ЕКМС) было исследовано влияние сажеобразования на температуру процесса окислительной конверсии богатых смесей метана с добавками H_2O и CO_2 , а также действие добавок характерных для продуктов газификации биомассы на бескислородную некаталическую конверсию метана в синтез-газ с учетом образования частиц сажи. Экспериментально получены температурные зависимости выхода сажи для пиролиза и окисления метана. На основе экспериментов в ударной трубе и результатов кинетических расчетов проанализирована возможность использования CO_2 в качестве окислителя метана для получения синтез-газа из смесей $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$. Выполнено прямое сравнение результатов расчетов по ЕКМС с имеющимися в литературе результатами экспериментов различных авторов.

В качестве наиболее значимых результатов можно выделить следующие:

1. Показано, что для богатых смесей ($\varphi > 8$) вследствие выделения тепла при образовании частиц сажи на больших временах наблюдается второй максимум температуры.

2. Установлено, что вариации концентраций добавок H_2O и CO_2 позволяют в широких пределах регулировать отношение H_2/CO в синтез-газе для получения различных целевых продуктов.

3. Показано, что для получения синтез-газа с необходимым отношением H_2/CO и снижения сажеобразования конверсию метана целесообразно проводить при температурах $T > 1800 \text{ K}$.

Полученные результаты представляются крайне важными и актуальными, поскольку исследование не только вносит существенный вклад в развитие научных основ процесса конверсии метана в синтез-газ, но и открывает дополнительную возможность практического использования биомассы для получения полезных продуктов.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, формулировки основных результатов и выводов, списка литературы из 109 наименований. Диссертация изложена на 109 страницах и включает в себя 38 рисунков и 1 таблицу.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования, сформулированы цель, задачи, научная новизна и практическая значимость

работы. Кратко описаны использованные методы исследования, приведены положения, выносимые на защиту, отмечен личный вклад автора.

В первой главе диссертации проведен литературный обзор по теме работы. Обсуждаются основные способы получения синтез-газа из метана. Рассмотрены современные кинетические механизмы окисления и пиролиза легких углеводородов, учитывающие образование сажи.

Во второй главе описан экспериментальный метод оптического определения выхода сажи и ее температуры. Представлено краткое описание ЕКМС, используемого для численных расчетов в диссертации.

Третья глава посвящена исследованию пиролиза и окисления метана в экспериментах на ударных трубах различной конструкции. Выполнено прямое сравнение расчетов по ЕКМС с экспериментальными данными, полученными разными авторами. В итоге численное моделирование по предложенному кинетическому механизму показало согласие с результатами экспериментов. Получены экспериментальные температурные зависимости выхода сажи при пиролизе и окислении метана в отраженных ударных волнах.

Четвертая глава посвящена влиянию сажеобразования на окислительную конверсию неразбавленных смесей метана с добавками H_2O и CO_2 . Рассматривались богатые смеси с коэффициентом избытка топлива $3.3 < \varphi < 10$. Показано, что для смесей ($\varphi > 8$) вследствие выделения тепла при образовании частиц сажи на временах порядка 0.1 с наблюдается второй максимум температуры. Для $\varphi = 8.0$ добавки H_2O и CO_2 позволяют варьировать отношение H_2/CO в широком диапазоне от 7 до 1, тогда как для $\varphi = 3.3$ отношение H_2/CO можно изменять в гораздо более узком интервале: от 2 до 1.

Пятая глава посвящена исследованию бескислородной конверсии смесей метана с добавками H_2 , H_2O , CO и CO_2 в синтез-газ. Время пребывания смеси в проточном реакторе при постоянной температуре составляло $t = 0.68$ с, что на несколько порядков превышает время реакции в экспериментах на ударных трубах. Тем не менее расчеты по ЕКМС показали хорошее согласие с экспериментальными данными в проточном реакторе температурных зависимостей мольных долей основных продуктов процесса. Показано, что для получения синтез-газа с необходимым отношением H_2/CO и снижения сажеобразования конверсию целесообразно проводить при температурах $T > 1800$ К. На основе экспериментов в ударной трубе и результатов кинетических расчетов показана возможность использования CO_2 в качестве окислителя метана для получения синтез-газа из смесей $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$.

Полученные в работе результаты являются новыми. Их достоверность обеспечивается использованием апробированных численных методов,

непротиворечивостью получаемых результатов и их согласием с результатами экспериментов.

Полученные результаты полностью отражены в 6 публикациях, в российских изданиях, входящих в перечень ВАК и в международные базы данных (Scopus и Web of Science). Материалы диссертации прошли апробацию на всероссийских и международных конференциях. Автореферат диссертации полностью отражает содержание диссертации.

Работа выполнена автором самостоятельно на высоком научном и методическом уровне. Результаты работы наряду с очевидной научной новизной имеют практическую значимость.

По тексту и содержанию работы имеется несколько вопросов и замечаний:

1) Не для всех смесей и условий экспериментов проведено прямое сравнение результатов расчетов с результатами экспериментов.

2) Какая величина функции поглощения сажи $E(m)$ использовалась при обработке экспериментов по выходу сажи?

3) Какова погрешность определения выхода сажи для экспериментов в ударной трубе?

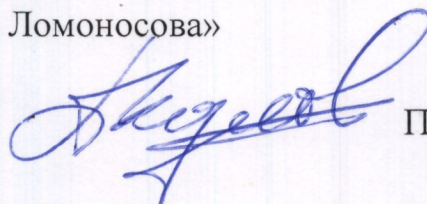
4) При сравнении результатов расчетов с результатами экспериментов в основном использовались эксперименты в ударных трубах в отраженных ударных волнах, когда газ-разбавитель покоится и вся система находится при определенных температуре и давлении в предположении постоянства плотности, при этом никаких градиентов по концентрации и температуре в объеме смеси не наблюдается. Однако в пятой главе упоминается проточный реактор при постоянной температуре. Как в этом случае проводилось сравнение результатов расчетов и экспериментов?

Указанные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей ценности диссертационной работы Ахуньянова А.Р. Доклад Ахуньянова А.Р. был заслушан и одобрен на семинаре в Научно-исследовательском институте механики МГУ имени М.В. Ломоносова — структурного подразделения Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова» (протокол № 2 от 22.04.2025).

Диссертация соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, и «Изменений, которые вносятся в Положение о присуждении ученых степеней», утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации № 335 от 21 апреля 2016 года, и является законченной научно-квалификационной работой, в которой создана и

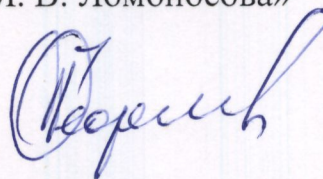
апробирована детальная кинетическая модель процесса кислородной и бескислородной конверсии метана в синтез-газ, учитывающая действие различных добавок (H_2 , H_2O , CO и CO_2), и образование микрогетерогенных частиц сажи в газовой фазе. Автор диссертации Ахуньянов Артур Ринатович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.17 — химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Ведущий научный сотрудник
лаборатории кинетических процессов в газах
Научно-исследовательского института механики МГУ имени М.В. Ломоносова
— структурного подразделения Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования «Московский
государственный университет имени М. В. Ломоносова»
к.ф.-м.н.



П.В. Козлов

И.о. директора
Научно-исследовательского института механики МГУ имени М.В. Ломоносова
— структурного подразделения Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования «Московский
государственный университет имени М. В. Ломоносова»
профессор РАН, д.ф.-м.н., проф.



Д.В. Георгиевский

«22» апреля 2025 г.

Адрес: 119192 Москва, Мичуринский просп., д. 1.

Тел.: +7 (495) 939-25-57

E-mail: kozlov@imec.msu.ru