

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.243.02,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ФЕДЕРАЛЬНОГО
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА ХИМИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ
ИМ. Н.Н. СЕМЁНОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ФИЦ ХФ РАН), ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 18.06.2025, протокол № 5
о присуждении Ахуньянову Артуру Ринатовичу
ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертация «Влияние продуктов газификации биомассы и процесса образования сажи на конверсию метана в синтез-газ» в виде рукописи по специальности 1.3.17 — химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества принята к защите 11 апреля 2025 года (протокол № 4) диссертационным советом 24.1.243.02, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук, 119991, Москва, ул. Косыгина, д. 4, приказом Рособнадзора № 105 н/к от 11 апреля 2012 года.

Соискатель **Ахуньянов Артур Ринатович** родился 22 октября 1994 года, гражданин Российской Федерации. В период с 01 сентября 2013 года по 01 августа 2017 года обучался на факультете «Институт лазерных и плазменных технологий» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», где ему была присуждена квалификация бакалавра по специальности «Ядерная физика

и технологии». В период с 01 сентября 2017 года по 01 августа 2020 года проходил обучение на факультете «Институт лазерных и плазменных технологий» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», где ему была присуждена квалификация магистра по специальности «Ядерные физика и технологии». С 01 июля 2020 года по 30 июня 2024 года Ахуньянов А.Р. обучался в аспирантуре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук по специальности 01.04.17 — химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

С 01 сентября 2016 года по 18 июля 2020 года Ахуньянов А.Р. работал инженером-исследователем лаборатории высокотемпературной кинетики и газовой динамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук. С 01 июля 2020 года по 16 января 2021 года работал инженером-исследователем в лаборатории окисления углеводородов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук. С 18 января 2021 года по настоящее время работает младшим научным сотрудником лаборатории окисления углеводородов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук.

Диссертация выполнена в лаборатории окисления углеводородов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук.

Научный руководитель — **Власов Павел Александрович**, гражданин Российской Федерации, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории окисления углеводов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

1. **Еремин Александр Викторович**, гражданин Российской Федерации, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории неравновесных процессов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук

2. **Салганский Евгений Александрович**, гражданин Российской Федерации, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории горения в высокоскоростных потоках Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация — **Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ имени М.В. Ломоносова)**, г. Москва, в своем положительном заключении, подписанном и.о. директора Научно исследовательского института механики МГУ имени М.В. Ломоносова, профессором РАН, доктором физико-математических наук, профессором **Георгиевским Дмитрием Владимировичем**, ведущим научным сотрудником лаборатории

кинетических процессов в газах Научно исследовательского института механики МГУ имени М.В. Ломоносова, кандидатом физико-математических наук **Козловым Павлом Владимировичем**, и утвержденном проректором МГУ имени М.В. Ломоносова, профессором РАН, доктором физико-математических наук, профессором **Федяниным Андреем Анатольевичем**, указала, что:

- 1). Не для всех смесей и условий экспериментов проведено прямое сравнение результатов расчетов с результатами экспериментов.
- 2). Непонятно, какая величина функции поглощения сажи $E(m)$ использовалась при обработке экспериментов по выходу сажи.
- 3). В диссертации не указано, 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?

Соискатель имеет 12 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации — 6. Работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях — 6, общим объемом 5 печатных листов.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Власов П.А., Ахуньянов А.Р., Смирнов В.Н. Экспериментальное и расчетно-теоретическое исследование пиролиза и окисления метана в

отраженных ударных волнах с учетом сажеобразования // Кинетика и катализ. — 2022. — Т. 63, № 2. — С. 160–177.

2. Ахуньянов А.Р., Власов П.А., Смирнов В.Н., Арутюнов А.В., Михайлов Д.И., Арутюнов В.С. Влияние образования микрогетерогенных частиц сажи на газофазную конверсию метана в синтез-газ. Роль добавок H_2O и CO_2 // Кинетика и катализ. — 2023. — Т. 64, № 6. — С. 681–696.

3. Ахуньянов А.Р., Власов П.А., Смирнов В.Н., Арутюнов А.В., Арутюнов В.С. Влияние добавок CO и CO_2 на образование синтез-газа при паровой конверсии метана из продуктов газификации биомассы // Горение и взрыв. — 2024. — Т. 17, № 1. — С. 49–64.

На автореферат поступили отзывы:

1. Отзыв на автореферат диссертации, подписанный доцентом кафедры суперкомпьютерного моделирования инженерно-физических процессов Института лазерных и плазменных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», кандидатом физико-математических наук **Богдановой Юлией Андреевной**. Отзыв положительный. По тексту автореферата у автора возникли следующие вопросы:

1). В работе проведено прямое сравнение концентраций промежуточных продуктов некаталитического риформинга метана с различными добавками, полученных экспериментально в проточном нагреваемом реакторе, с результатами расчетов автора. На чем основана методика моделирования процессов в проточном реакторе?

2). При каких условиях CO_2 можно рассматривать в качестве окислителя для метана в газовой фазе?

3). Обычно риформинг метана проводится в присутствии катализатора. В чем преимущество некаталитического процесса получения синтез-газа?

2. Отзыв на автореферат диссертации, подписанный старшим научным сотрудником лаборатории неравновесных процессов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), кандидатом физико-математических наук **Коршуновой Майей Ручировной**. Отзыв положительный. При чтении автореферата возникли следующие вопросы:

1). Поскольку метан является простейшим алканом, а также широко используется в качестве модельного углеводорода для численных расчетов процессов горения, существует множество кинетических схем, описывающих его окисление и пиролиз, в том числе учитывающих процессы сажеобразования. В чем заключалась мотивация автора в разработке нового кинетического механизма пиролиза и окисления метана?

2). Автор приводит множество сопоставлений между численным моделированием и экспериментальными измерениями, но не приводит погрешность экспериментальных измерений. Возможно ли ее оценить?

3. Отзыв на автореферат диссертации, подписанный ведущим научным сотрудником лаборатории численного моделирования магнитоплазменной аэродинамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), доктором физико-математических наук **Филимоновой Еленой Александровной**. Отзыв положительный. По материалам автореферата у автора возникли следующие замечания:

1). Не представлены рисунки сравнения результатов кинетических расчетов Ахуньянова А.Р. с результатами экспериментов по определению временной зависимости концентрации СО в отраженных ударных волнах для различных температур.

2). В автореферате не приведены ссылки на работы, которые были использованы в расчетах, упоминаются, видимо, только первые авторы.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что:

1. Официальный оппонент д.ф.-м.н., проф. **Еремин Александр Викторович** — ведущий ученый, автор известных научных работ по экспериментальному и теоретическому исследованию кинетики высокотемпературных реакций в ударных волнах и пламенах. Им исследовались различные процессы термического распада и конденсации соединений углерода, в частности, частиц сажи и частиц углерода, а также оптические свойства и каталитическая активность образующихся конденсированных частиц в зависимости от условий экспериментов. Еремин А.В. рассматривал процессы воспламенения в ударных волнах и снижение вредных выбросов при введении в реагирующую смесь различных добавок. В работах Еремина А.В. с академиком Фортовым В.Е. был открыт волновой характер химической конденсации, инициирующей бескислородное горение и детонацию смесей ацетилена. Под его руководством была доказана возможность промотирования детонационной волной конденсации в ацетилене с добавками метана, а также установлены закономерности формирования метало-углеродных наночастиц при пиролизе и фотолизе газообразных соединений. Еремин А.В. является ведущим экспертом в области кинетики высокотемпературных реакций в ударных волнах, который может по существу оценить диссертационную работу, представленную Ахуньяновым А.Р.

2. Официальный оппонент д.ф.-м.н. **Салганский Евгений Александрович** является признанным специалистом по конверсии биогаза в синтез-газ, некаталитической конверсии природного газа, термодинамическим оценкам процессов риформинга различных углеводородов, а также в области переработки тяжелых нефтяных остатков методом фильтрационного горения. Большой и разнообразный опыт, высокая научная квалификация Салганского Е.А. позволяют ему всесторонне оценить представленную диссертационную работу.

3. Ведущая организация **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ имени М.В. Ломоносова)** является одним из ведущих научных учреждений в области физико-химической кинетики в газовой динамике. Лаборатория газодинамики взрыва и реагирующих систем Научно-исследовательского института механики МГУ имени М.В. Ломоносова имеет более чем полувековой опыт исследования релаксационных процессов в ударных волнах, использования экспериментальных методов для наблюдения физико-химических превращений в ударных волнах, взаимодействий ударных волн с неоднородностями и преградами, разработки аналитических моделей для исследования газодинамических течений, использования ударных труб для получения радиационных характеристик газов в условиях входа спускаемых аппаратов в атмосферу Земли и других планет. Высокая научная квалификация сотрудников МГУ имени М.В. Ломоносова позволяет дать исчерпывающую экспертную оценку представленной диссертационной работы.

Диссертационный совет отмечает, что в рассматриваемой работе диссертантом усовершенствована и протестирована единая кинетическая модель для описания процесса конверсии метана с различными добавками,

характерными для продуктов газификации биомассы в синтез-газ, с учетом сажеобразования. Выполнены эксперименты в ударной трубе в отраженных ударных волнах по определению выхода сажи, пиролизу и окислению метана. Результаты моделирования по единой кинетической модели сажеобразования показали хорошее согласие с результатами собственных экспериментов по сажеобразованию и экспериментов других авторов по окислению метана с различными добавками с образованием синтез-газа. Исследовано влияние сажеобразования на температуру богатых смесей метана с добавками H_2O и CO_2 и показано, что для добавки H_2O наблюдается образование второго выраженного максимума температуры в процессе риформинга метана. Определены температура и давление, при которых CO_2 может рассматриваться как эффективный окислитель метана в некаталитическом процессе.

Теоретическая значимость исследования заключается в усовершенствовании единой кинетической модели для количественного описания процессов кислородной и бескислородной конверсии метана с различными добавками в синтез-газ с учетом образования в газовой фазе конденсированных частиц сажи.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики. Кинетическое моделирование высокотемпературного риформинга бескислородных смесей метана с добавками H_2 , H_2O , CO и CO_2 в синтез-газ показывает, что добавки H_2O и CO_2 в бескислородных смесях с метаном при определенных условиях выступают в качестве окислителя. Данный результат позволяет снизить экологическую нагрузку на окружающую среду всего процесса и уменьшить выбросы парникового газа CO_2 , который используется в качестве окислителя исходного метана.

Полученные экспериментальные профили выхода сажи для процесса пиролиза и окисления метана могут быть полезны для тестирования новых, более совершенных кинетических моделей сажеобразования.

Оценка достоверности результатов исследования выявила обоснованность выводов работы, опирающихся на большой объем экспериментальных данных. Воспроизводимость полученных результатов обеспечивается использованием современных методов диагностики и научных приборов: установки «ударная труба», оснащенной необходимым оборудованием для проведения абсорбционно-эмиссионных измерений и цифровой регистрации экспериментально измеряемых параметров сажеобразования. Единая детальная кинетическая модель, описывающая пиролиз, окисление и образование частиц сажи в исследуемых смесях метана с различными добавками, многократно тестировалась и сравнивалась с результатами экспериментов. Полученные данные свидетельствуют о высокой степени достоверности результатов исследования.

Личный вклад соискателя состоит в личном участии на всех этапах исследования, описанного в диссертации. Постановка цели и задачи исследования осуществлялась непосредственно автором. Автором усовершенствована кинетическая схема, позволяющая количественно описать результаты экспериментов по конверсии метана в синтез-газ с различными добавками с учетом сажеобразования. Определение выхода сажи в эксперименте по пиролизу и окислению метана, обработка и анализ прочих результатов экспериментов, подготовка статей и представление докладов на научных конференциях проводились лично автором.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания и вопросы:

1. В чем заключается отличие единого кинетического механизма сажеобразования от механизма Хиблота?

2. Являлись ли константы скорости гомогенных и гетерогенных реакций установочными параметрами, при изменении которых достигалось хорошее согласие с экспериментом?

Соискатель Ахуньянов А.Р. ответил на задаваемые ему вопросы и привел собственную аргументацию:

1. Эти кинетические механизмы по-разному описывают реакции в газовой фазе. Механизм Хиблота описывает единственный канал увода ацетилена на стенку реактора с образованием твердого углерода на стенке. Константа скорости этой реакции вводилась вручную (подбиралась). В предложенном едином кинетическом механизме сажеобразования впервые использовалась кинетическая модель образования активных и неактивных зародышей и частиц сажи в газовой фазе.

2. Полный набор констант скорости во всех расчетах были строго фиксированными и в ходе исследования не менялись.

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует требованиям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, и «Изменениям, которые вносятся в Положение о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 335 от 21 апреля 2016 года, и принял решение присудить **Ахуньянову Артуру Ринатовичу** ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.17 — химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 24 человек, из них 12 докторов наук по специальности 1.3.17 — химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества, участвовавших в заседании, из 30 человек, входящих в состав совета, проголосовали:

за присуждение ученой степени — 23,
против присуждения ученой степени — нет,
недействительных бюллетеней — 1.

Председатель

диссертационного совета 24.1.243.02

доктор физико-математических наук

М.Г. Голубков

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.243.02

кандидат физико-математических наук

С.Ю. Сарвадий

18 июня 2025 года