

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ИНСТИТУТ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА ИМЕНИ А. В. ЛЫКОВА
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

УДК 536.46

ШИМЧЕНКО
Сергей Юрьевич

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
ПРИ САМОВОСПЛАМЕНЕНИИ ДВУХФАЗНЫХ
ТОПЛИВНЫХ СМЕСЕЙ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ
600–1200 К**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.17 – химическая физика, горение и взрыв,
физика экстремальных состояний вещества

Минск 2021

Работа выполнена в Государственном научном учреждении «Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси»

Научный руководитель **Пенязьков Олег Глебович**, доктор физико-математических наук, академик НАН Беларуси, заведующий отделением физики и химии неравновесных сред, директор Государственного научного учреждения «Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси»

Официальные оппоненты: **Жданок Сергей Александрович**, доктор физико-математических наук, академик НАН Беларуси, профессор, заслуженный деятель науки Республики Беларусь, лауреат Государственной премии Республики Беларусь, главный научный сотрудник ООО «Передовые исследования и технологии»

Шабуня Станислав Иванович, кандидат физико-математических наук, заведующий отделением математического моделирования Государственного научного учреждения «Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси»

Оппонирующая организация **Государственное научное учреждение «Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси», г. Витебск**

Защита состоится 7 сентября 2021 г. в 14–00 на заседании Совета по защите диссертаций Д 01.13.01 при Государственном научном учреждении «Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси» по адресу 220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 15, корп. 3, конференц-зал. E-mail совета: sovet@itmo.by.

Телефон ученого секретаря совета +375 17 3208387; факс +375 17 2922513.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси.

Автореферат разослан 5 июля 2021 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций Д 01.13.01
кандидат физико-математических наук, доцент

Ю. В. Жукова

ВВЕДЕНИЕ

Изучение явления самовоспламенения топливных смесей тесно связано как с решением многих прикладных задач: инициирование горения, распространение пламени, детонация, так и с фундаментальными проблемами создания адекватных кинетических механизмов химических реакций. Измеряемая в эксперименте задержка самовоспламенения, или период индукции смеси, отражает скорость протекания химических реакций и является функцией, зависящей от температуры и исходных концентраций топлива и окислителя. Поэтому локальные неоднородности этих параметров, в особенности температуры, оказывают сильное влияние на скорость реакции и, соответственно, процессы воспламенения. Объемное самовоспламенение с коротким (до нескольких сотен микросекунд) периодом индукции обычно исследуется в ударных трубах в газе за отраженной ударной волной. Оно характеризуется высокой степенью пространственной однородности, так как возмущения потока за падающей волной не успевают воздействовать на локальное состояние среды вблизи отражающей стенки и необходимо принимать во внимание только процессы поступательно-колебательной релаксации.

С понижением температуры при сжатии смеси и, соответственно, с экспоненциальным ростом значения ее периода индукции до нескольких миллисекунд может происходить возгорание посторонних микронных частиц, которые случайно находятся в измерительном объеме экспериментальных установок. Во многих случаях они начинают возгораться при более низких температурах и вызывают дополнительный локальный нагрев горючей смеси и ее последующее вынужденное очаговое зажигание. Микрочастицы металлов и стенки измерительного объема экспериментальных установок могут вызывать каталитические эффекты, связанные с ингибированием либо ускорением скоростей химических реакций. При работе с заранее испаренными жидкими топливами на установках быстрого сжатия или ударных трубах текущее парциальное давление паров вблизи холодных стенок установки может превышать их равновесное значение и, как следствие, происходит конденсация топлива. Это вызывает перераспределение его концентрации в измерительном объеме, а выделившаяся теплота фазового перехода может влиять на локальные параметры смеси в газовой фазе. Поэтому в зависимости от условий эксперимента при изучении и моделировании физико-химических процессов, протекающих в сложных топливовоздушных газовых смесях, содержащих твердые частицы и/или пары, зачастую их необходимо рассматривать как двухфазные среды.

Воспламенение гетерогенной среды, которая состоит из угольных микрочастиц, метана и воздуха, является причиной большого количества

аварий в угольнодобывающей промышленности. Несмотря на многолетние исследования в этой области, экспериментальное определение основных физико-химических факторов, влияющих на появление и развитие горения в таких системах при низких температурах, до сих пор остается актуальной научной и прикладной задачами. В свою очередь изучение характерных особенностей одно- и двухстадийного режимов самовоспламенения *n*-алканов, в частности *n*-декана, в температурном диапазоне 600–800 К служит ключевым источником экспериментальных данных о периоде индукции химической реакции, которые необходимы для верификации кинетических механизмов окисления реальных топливных смесей при проектировании и эксплуатации энергетических установок.

Таким образом, изучение физических и химических процессов, влияющих на закономерности самовоспламенения при сжатию двухфазных реагирующих сред, состоящих из угольных микрочастиц, метана, а также паров *n*-декана с воздухом, является актуальной научной задачей, решаемой в диссертационной работе.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами

Тема диссертационной работы связана с планами научно-исследовательских работ Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси в период 2014–2020 гг. Результаты получены в ходе выполнения:

– государственной программы научных исследований «Энергетические системы, процессы и технологии», подпрограмма «Эффективные теплофизические процессы и технологии», задание № 2.59 «Горение топливно-воздушных смесей при адиабатическом сжатии в диапазоне условий с отрицательным значением зависимости коэффициента скорости реакции от температуры» (№ гос. регистрации 20190058, 2019–2020 гг.);

– проекта «Комплексное исследование процессов воспламенения и горения перспективных композитных топлив, в том числе и топлив, содержащих высокоэнергетичные наноконпоненты», договор № Ф14Р-184 от 23.05.2014 г. с БРФФИ (№ гос. регистрации 20143276, 2014–2016 гг.);

– проекта «Влияние наноразмерных углеродных частиц на процессы горения жидких углеводородов», договор № Ф15РМ-044 от 4.05.2015 г. с БРФФИ (№ гос. регистрации 20151467, 2015–2017 гг.);

– проекта «Физическое и математическое моделирование проблем энергосбережения при протекании неравновесных процессов в газопылевых средах», договор № Т16Р-078 от 20.05.2016 г. с БРФФИ (№ гос. регистрации 20163609, 2016–2018 гг.);

– проекта «Исследование новых способов энергоэффективного сжигания жидких углеводородов», договор № Т18Р-122 от 30.05.2018 г. с БРФФИ (№ гос. регистрации 20181590, 2018–2020 гг.).

Цель и задачи исследования

Цель работы – установить основные физико-химические закономерности, определяющие процессы самовоспламенения двухфазных топливовоздушных сред, содержащих угольные микрочастицы, метан и пересыщенные пары н-декана, при адиабатическом сжатии до температур 600–1200 К.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Адаптировать экспериментальный метод измерения скоростей горящих угольных частиц размером 20–32 мкм для визуализации 3-мерного нестационарного течения газа в камере сгорания установки быстрого сжатия.

2. Определить температуру и характерные времена самовозгорания и горения угольных частиц (диаметром менее 20 мкм и 20–32 мкм) в воздухе при сжатии до температур 800–1200 К и давлений 1,3–1,9 МПа.

3. Определить кинетические параметры и характер воспламенения стехиометрической смеси метана с воздухом, в том числе при наличии специально вводимых угольных микрочастиц диаметром 20–32 мкм, при сжатии до температур 970–1070 К и давлений 1,6–1,9 МПа.

4. Установить температуры горящих микрочастиц угля в воздухе и стехиометрической метановоздушной смеси при сжатии до температур 800–1200 К и давлений 1,3–1,9 МПа, установить их влияние на характер воспламенения газовой фазы.

5. Измерить времена задержки самовоспламенения паров н-декана с воздухом для холоднопламенной и горячей стадий процесса при температурах сжатия 600–800 К, давлениях 0,8–1,3 МПа и эквивалентных отношениях топливо–окислитель в диапазоне 0,5–1,5, установить пространственное положение очагов самовоспламенения н-декана в объеме камеры сгорания в данном диапазоне условий.

6. Определить термодинамические параметры перехода от одностадийного к двухстадийному режиму самовоспламенения паров н-декана с воздухом в диапазонах температур 600–800 К, эквивалентных отношений топливо–окислитель 0,5–1,5 и давлений 0,8–1,3 МПа.

7. Установить влияние процесса неравновесной конденсации паров н-декана при адиабатическом сжатии на изменения средней температуры, концентрации и давления смеси в камере сгорания.

Объект исследования – процессы аэродинамики, конденсации, воспламенения стехиометрической метановоздушной смеси в присутствии угольных

микрочастиц, воспламенения паров *n*-декана с воздухом, возгорания и горения микрочастиц.

Предмет исследования – вихревая структура течения газа, параметры и времена задержек самовоспламенения топливовоздушных смесей, характерные времена и критические условия возгорания частиц, факторы, влияющие на процессы воспламенения.

Научная новизна

Впервые исследовано влияние процессов пересыщения и конденсации паров топлива вблизи холодных стенок камеры сгорания при адиабатическом нагреве реагирующей смеси на изменения объемной концентрации топлива, температуры и давления смеси.

Получены экспериментальные данные о механизмах низкотемпературного воспламенения гетерогенной и паровоздушной смесей, позволившие обосновать влияние микрочастиц и процесса неравновесной конденсации паров на кинетику и неоднородность самовоспламенения двухфазных топливных смесей.

Адаптирован метод визуализации объемной структуры течения газа и определения поля скоростей, основанный на пространственно-временной фоторегистрации движения горящих угольных микрочастиц.

Полученная информация необходима для построения и верификации кинетических схем химических реакций углеводородов и при моделировании процессов, протекающих при взрывах метана и угольных пылей в шахтах, горения в камерах двигателей внутреннего сгорания и газовых турбинах.

Положения, выносимые на защиту

1. Адаптированный метод визуализации нестационарного течения газа в камере сгорания установки быстрого сжатия, основанный на скоростной фотографии перемещения горящих микрочастиц угля диаметром 20–32 мкм в газовом потоке, позволяет установить объемную структуру течения газа, определить ее временные и пространственные масштабы, измерить характерную скорость микрочастиц 5–10 м/с, восстановить распределение их радиальных компонент и эволюцию течения.

2. Воспламенение стехиометрической метановоздушной смеси с угольными микрочастицами диаметром 20–32 мкм при температурах менее 1200 К происходит за счет ее вынужденного зажигания от микрочастиц, время возгорания которых составляет 0,45–23 мс, а температура возрастает от температуры самовозгорания (850 К) до температуры горения 2500 ± 200 К, причем установленная близость минимальной температуры смеси, необходимой для зажигания метана от угольных микрочастиц (1030 К) и для воспламенения метановоздушной смеси (1060 К), позволяет распространить справедливость

предложенного механизма зажигания на режимы воспламенения метана от случайных примесных частиц, существующих в экспериментальных установках.

3. Выявленная закономерность перехода между одностадийным и двухстадийным режимами самовоспламенения *n*-декана с воздухом, основанная на измеренных значениях периода индукции для холоднопламенной и горячей стадий процесса при температурах 600–800 К, давлениях 0,8–1,3 МПа и эквивалентных отношениях топливо–окислитель 0,5–1,5, позволяет определять термодинамические параметры возникновения указанных режимов самовоспламенения *n*-декана.

4. Установленный процесс неравновесной конденсации паров *n*-декана из топливозвоздушной смеси вблизи холодных стенок камеры сгорания и их перенос тороидальным вихревым движением газа над поверхностью сжимающего поршня при температурах 600–800 К и давлениях 0,8–1,3 МПа, приводящий, в зависимости от начального состава, к росту средней температуры смеси на 15–100 К по сравнению с адиабатической и к существенному снижению эквивалентного отношения топливо–окислитель, определяет неоднородность и пространственное положение первичных очагов самовоспламенения *n*-декана.

Личный вклад соискателя ученой степени

Результаты, представленные в диссертации, получены автором лично. В работах, опубликованных в соавторстве, соискатель участвовал в постановке целей и задач исследования, проведении экспериментов, обработке и анализе данных, подготовке материалов к публикации. Научный руководитель О. Г. Пенязьков осуществлял общее руководство диссертационной работой и постановку задач исследования. В. В. Лещевич и Н. Л. Евменчиков принимали участие в планировании и проведении экспериментов и обсуждении результатов. Результаты соавторов А. В. Федорова и Д. А. Тропина по совместной публикации в текст диссертации не входят.

Апробация результатов диссертации

Результаты исследований были представлены и обсуждались на конференциях: 25th, 26th International Colloquium on Dynamics of Explosions and Reactive Systems (Англия, 2015 г.; США, 2017 г.), 31th International Conference on Equations of State for Matter (Россия, 2016 г.), 12th, 13th International Conference of Young Scientists on Energy Issues (Литва, 2015 г., 2016 г.), 8^я и 9^я Ежегодные научные конференции отдела горения и взрыва ИХФ РАН (Россия, 2015 г., 2016 г.), Четвертый и Шестой Минские международные коллоквиумы по физике ударных волн, горению и детонации (Республика Беларусь, 2015 г., 2019 г.).

В соответствии с распоряжением Президента Республики Беларусь № 233 рп от 9 декабря 2019 года «О поощрении талантливых молодых ученых» соискателю ученой степени за результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, на 2020 год назначена стипендия Президента Республики Беларусь.

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 15 научных работах: 5 – статьи в рецензируемых научных изданиях (общим объемом 3,3 авторского листа), из которых 4 входят в список ВАК (3,0 авторских листа); и 10 – в других научных изданиях и материалах конференций. Общий объем публикаций составляет 6,6 авторских листа.

Структура и объем диссертации

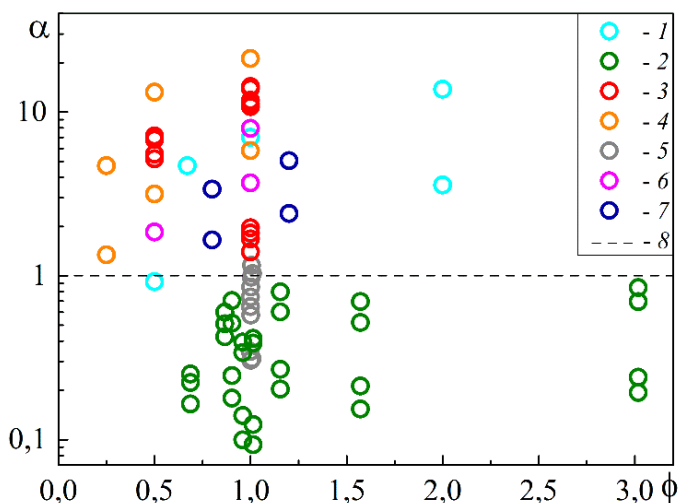
Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, перечня условных обозначений, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Полный объем диссертации составляет 109 страниц. Работа содержит 42 иллюстрации, 3 таблицы и 6 приложений (11 страниц). Библиографический список включает 129 наименований (11 страниц), из которых 15 – работы соискателя.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе представлен обзор и результаты работ по изучению воспламенения и горения двухфазных топливных смесей.

Исследование систем, в которых твердая дисперсная фаза распределена в газе, – гетерогенных смесей, начато в конце XIX века и было обусловлено большим количеством аварий, происходящих в каменноугольных шахтах. Многие работы направлены на определение условий, при которых такая дисперсная среда способна самовоспламениться и поддерживать горение. Изучение гетерогенных смесей включает в себя измерение пределов воспламенения дисперсного компонента с добавлением реагирующего газа, температуры и скорости распространения волны горения. Из литературного обзора следует, что, как правило, невозможно предсказать поведение гетерогенных смесей при анализе данных, полученных для каждого компонента по отдельности.

Анализ литературных данных по измерению задержек самовоспламенения n-декана показал, что в большинстве случаев пары топлива достигали пересыщенного состояния при начальной температуре стенок экспериментальных установок (рисунок 1).



1 – УТ¹, $\phi = 0,5-2$; 2 – УТ², $\phi = 0,9-3$;
 3 – УТ³, $\phi = 0,5-1$; 4 – УТ⁴, $\phi = 0,25-1$;
 5 – УТ⁵, $\phi = 1$; 6 – УБС⁶, $\phi = 0,5-1$;
 7 – УБС⁷, $\phi = 0,8-1,2$; 8 – $\alpha = 1$

Рисунок 1. – Зависимости степени пересыщения паров n-декана α при температуре стенки от эквивалентного отношения ϕ в экспериментах по измерению задержки воспламенения, представленных в литературе

Таким образом, наличие реакционноспособной дисперсной твердофазной составляющей или паров топлива в пересыщенном состоянии в реагирующей смеси может сильно повлиять на ход протекания взаимосвязанных физико-химических процессов самовоспламенения. Понимание этих взаимосвязей открывает возможности управления процессами воспламенения и горения, необходимые, с одной стороны, для предотвращения взрывов и пожаров на производствах, а с другой – для совершенствования технологий сжигания топлив. В разделе 1.2 приведены описания установок быстрого сжатия (УБС), которые использовались для изучения кинетических закономерностей гомогенного и гетерогенного горения. Эти устройства наряду с ударными трубами (УТ) используются для наблюдений за изменением состояния газа при воспламенении с относительно короткими (до 50 мс) временами задержки самовоспламенения, в отличие от статических реакторов, применяющихся для смесей с более длинными периодами индукции.

Во второй главе изложены методики проведения экспериментов и описано применяемое оборудование.

Результаты диссертации получены на установке быстрого сжатия, реализующей следующие конечные параметры сжатия в камере сгорания:

¹ Pfahl, U. Self-ignition of diesel-relevant hydrocarbon-air mixtures under engine conditions / U. Pfahl, K. Fieweger, G. Adomeit // Symposium (Intern.) on Combustion. – 1996. – Vol. 26, iss. 1. – P. 781–789.

² Olchanski, E. Decane oxidation in a shock tube / E. Olchanski, A. Burcat // Int. J. of Chemical Kinetics. – 2006. – Vol. 38, iss. 12. – P. 703–713.

³ Zhukov, V. P. Autoignition of n-decane at high pressure / V. P. Zhukov, V. A. Sechenov, A. Y. Starikovskii // Combustion and Flame. – 2008. – Vol. 153, iss. 1–2. – P. 130–136.

⁴ A shock tube study of the ignition of n-heptane, n-decane, n-dodecane, and n-tetradecane at elevated pressures / H. P. S. Shen [et al.] // Energy & Fuels. – 2009. – Vol. 23, iss. 5. – P. 2482–2489.

⁵ Shock tube study of n-decane ignition at low pressures / X. F. Nie [et al.] // Acta Mechanica Sinica. – 2012. – Vol. 28, iss. 1. – P. 79–82.

⁶ Autoignition of n-decane and multi-component surrogates of kerosene in an optical rapid compression machine [Electronic resource] / C. Strozzi [et al.] // 27th Intern. Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems: proceedings of conference, Beijing, 28th July–2nd August 2019. – Mode of access: <http://www.icders.org/ICDERS2019/abstracts/ICDERS2019-349.pdf>. – Date of access: 20.04.2021.

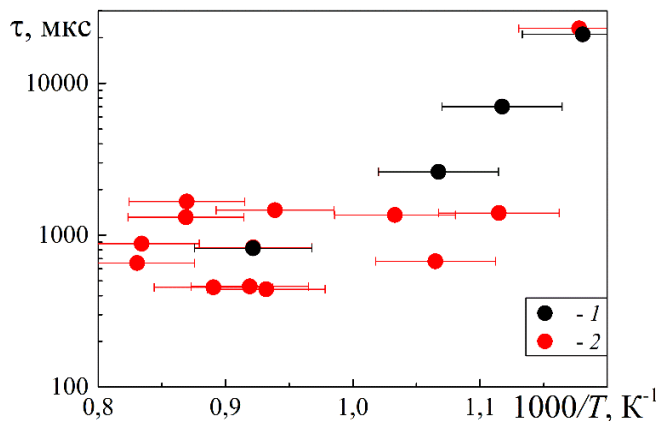
⁷ Kumar, K. Autoignition of n-decane under elevated pressure and low-to-intermediate temperature conditions / K. Kumar, G. Mittal, C. J. Sung // Combustion and Flame. – 2009. – Vol. 156, iss. 6. – P. 1278–1288.

температура – до 1200 К и давление – до 2 МПа. Установленное в торце камеры плоскопараллельное кварцевое окно диаметром 50 мм обеспечивает обзор внутреннего объема под различными углами с помощью высокоскоростных камер (67 500 кадров в секунду и разрешением 512×512 пикселей). Для наблюдения низкоинтенсивной хемиллюминесценции холодного пламени использовалась камера с электронно-оптическим усилителем яркости изображения. Давление в камере сгорания измерялось высокотемпературным датчиком давления Kistler 6031U18. Регистрация собственного свечения газа, возникающего при химических реакциях, осуществлялась через боковую стенку камеры сгорания с использованием оптического волокна и фотоэлектронных умножителей (ФЭУ). Первый из них фиксировал свечение в диапазоне 300–600 нм. Второй был настроен на регистрацию холоднопламенной стадии воспламенения на одной из наиболее интенсивных полос флюоресценции формальдегида НСОН через узкополосный интерференционный фильтр на длине волны 395,2±10 нм. Третий ФЭУ применялся в комбинации с узкополосным интерференционным фильтром на длине волны $\lambda = 431,5 \pm 1,5$ нм, соответствующей переходу возбужденного радикала СН из состояния 2Δ в состояние 2Π. СН радикал является основным промежуточным продуктом в реакциях окисления всех углеводородов, поэтому резкое увеличение его концентрации указывает на начало горячей стадии воспламенения. Критерием для определения задержки воспламенения при сгорании смеси являлся 5 %-й прирост давления в камере сгорания по отношению к давлению, достигающемуся в конце стадии сжатия, в случае возгорания микрочастиц – достижение максимального значения интенсивности излучения при их возгорании.

В разделе 2.4 описан фотоэмиссионный способ измерения температуры горящих микрочастиц угля. Процедура приготовления топливовоздушных смесей описана в разделе 2.5. Метод определения поля скоростей тороидального вихревого течения, основанный на измерении смещения увлеченных потоком горящих микрочастиц угля диаметром $d_p = 20\text{--}32$ мкм, описан в разделе 2.7. В разделе 2.8 приведен анализ погрешностей измерения, позволивший определить максимальную относительную погрешность измерения температуры в приближении адиабатического ядра $\delta T_c = \pm 4,9$ %.

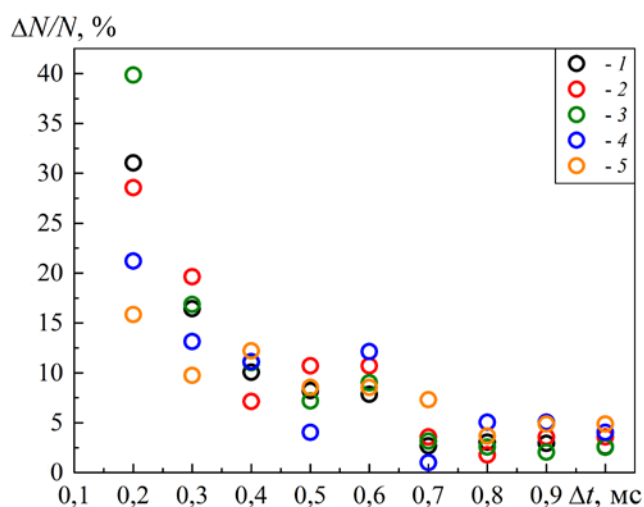
В третьей главе приведены результаты исследования физико-химических закономерностей процесса воспламенения в системе воздух–метан–микрочастицы угля в диапазонах температур 800–1200 К и давлений 1,3–1,9 МПа. Элементный состав частиц следующий: С – 89,5 %, О – 9,3 %, Al – 1,0 %, Са – 0,2 %. Раздел 3.1 содержит данные о времени задержки возгорания τ_{coal} фракций угольных микрочастиц с диаметрами $d_p < 20$ мкм и $d_p = 20\text{--}32$ мкм в воздухе при массовой концентрации частиц $c = 300$ г/м³. Типичные значения

измеренных τ_{coal} находятся в интервале от 0,45 мс до 23 мс в зависимости от температуры T_c нагретого воздуха (рисунок 2). Проведение экспериментов при различных параметрах сжатия позволило определить минимальную температуру адиабатически нагретого воздуха, при которой происходит самовозгорание микрочастиц, – 850 ± 35 К.



1 – $d_p < 20$ мкм; 2 – $d_p = 20\text{--}32$ мкм
Рисунок 2. – Задержки самовозгорания угольных микрочастиц в воздухе

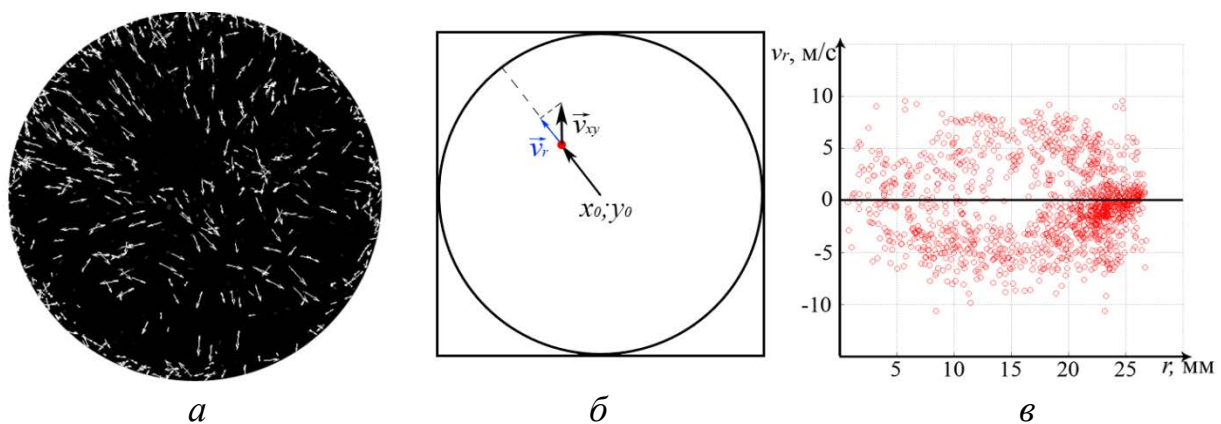
Измерение времени сгорания микрочастиц при их различных массовых концентрациях 300 г/м^3 ($\phi = 0,6$) и 1250 г/м^3 ($\phi = 2,6$), и температурах газа $937\text{--}1151$ К показывает, что заметная часть частиц (15–40 %) сгорает за промежуток времени Δt от 0 до 0,2 мс и только 2–6 % частиц имеют время сгорания в интервале 0,9–1 мс (рисунок 3). Установлено, что увеличение температуры газа приводит к сокращению времени горения. Влияние изменения массовой концентрации частиц на продолжительность их горения не обнаружено. Время горения микрочастиц угля $d_p = 20\text{--}32$ мкм является достаточным для использования их в качестве маркеров для определения поля скоростей и структуры газодинамического течения в объеме УБС.



1 – $d_p = 20\text{--}32$ мкм, $c = 1252 \text{ г/м}^3$;
 2 – $d_p < 20$ мкм, $c = 1256 \text{ г/м}^3$;
 3 – $d_p = 20\text{--}32$ мкм, $c = 296 \text{ г/м}^3$;
 4 – $d_p = 20\text{--}32$ мкм, $c = 294 \text{ г/м}^3$;
 5 – $d_p < 20$ мкм, $c = 294 \text{ г/м}^3$
Рисунок 3. – Динамика изменения доли частиц $\Delta N/N$, время сгорания которых составляет Δt

В разделе 3.2 приведены результаты измерения скорости и анализ структуры генерируемого поршнем течения газа в камере сгорания установки быстрого сжатия. Визуализирующими маркерами являлись горящие микро-

частицы активированного угля диаметром $d_p = 20\text{--}32$ мкм, увлекаемые потоком газа. С помощью скоростной фотосъемки были определены смещения частиц между двумя последовательными снимками и, соответственно, проекции их скоростей v_{xy} . Движение частиц не является хаотичным и преимущественно направлено вдоль радиуса камеры (рисунок 4, а). Максимальные значения v_{xy} составляют 5–10 м/с, что коррелирует со средней скоростью движения поршня. По причине того, что горящие частицы движутся по линиям тока тороидального вихря, целесообразно рассматривать проекцию скорости на ось, совпадающую с радиусом камеры сгорания, v_r (рисунок 4, б). Приняв за положительное значение проекции скорости v_r при движении от центра к краю, а отрицательное значение v_r – в обратном направлении, полученные таким образом распределения v_r от положения r в различные моменты времени демонстрируют, что за 0,43 мс до конца такта сжатия на оси и около стенок камеры ($r = 0$ и $r = 25$ мм) радиальные компоненты скоростей частиц преимущественно характеризуются малыми значениями, а на расстоянии 10–20 мм – высокими (рисунок 4, в). Такое распределение вызвано движением частиц вдоль линий тока тороидального течения газа.



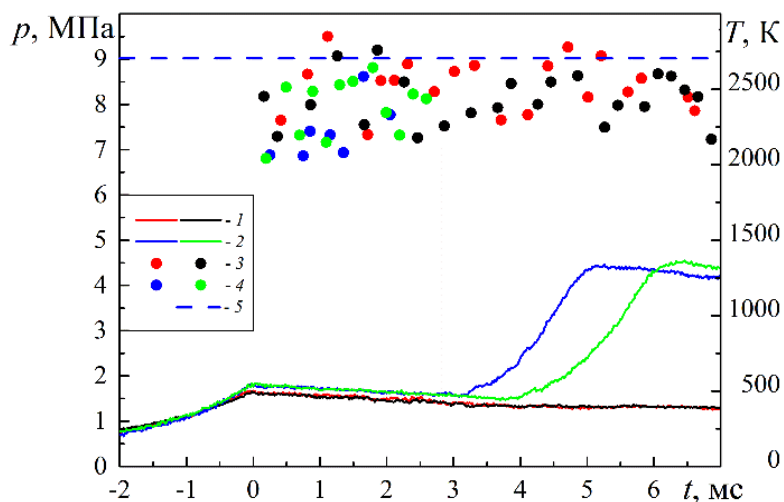
а – фотография с направлением движения горящих угольных микрочастиц;
б – определение радиальной компоненты скорости v_r ; **в** – распределение значений v_r
 в зависимости от r

Рисунок 4. – Регистрация движения частиц и определение газодинамического течения по фотографиям камеры сгорания УБС

Через 1 мс после конца такта сжатия распределение проекций скоростей становится почти однородным, что связано с диссипацией упорядоченного движения газа. Однако из-за большого разброса точек нельзя однозначно связать развитие газодинамического явления и поведение совокупности точек на изображении. Тем не менее, ввиду простоты реализации данный способ визуализации течения может быть применен для оценки его скоростей, а также для разработки мер по подавлению вихреобразования и оптимизации аэродинамики внутри камер сгорания.

В разделе 3.3 представлены результаты исследования воспламенения гетерогенной смеси, содержащей частицы активированного угля $d_p = 20\text{--}32$ мкм при их массовой концентрации 300 г/м^3 , в диапазоне температур $970\text{--}1070\text{ К}$. Возгорание микрочастиц, начинающееся при температурах ниже, чем воспламенение метана при стехиометрическом отношении с воздухом, приводит к уменьшению температуры воспламенения метана в гетерогенной смеси.

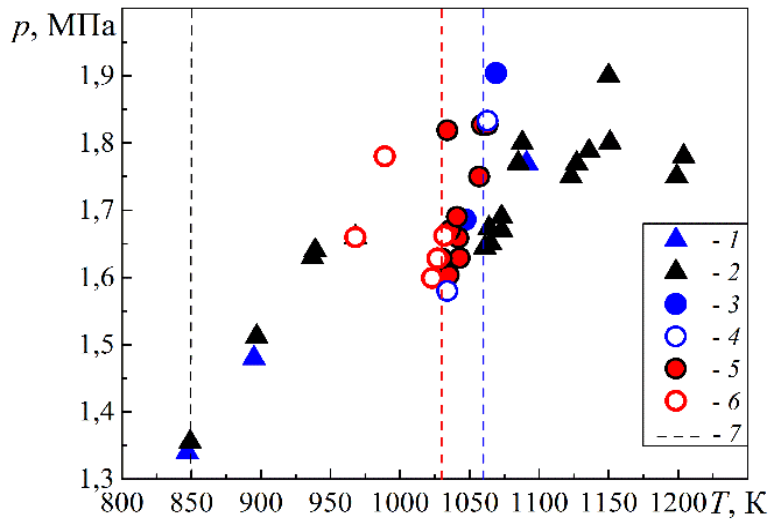
Обнаружено, что возгорание отдельных частиц гетерогенной смеси происходит на стадии сжатия при температурах выше 850 К , что согласуется с измеренной минимальной температурой возгорания. При дальнейшем росте температуры газа количество загорающих частиц увеличивается, и их горение продолжается вплоть до момента зажигания метана. Измеренная фотоэмиссионным пирометром температура горящих частиц составляет $2500\pm 200\text{ К}$ (рисунок 5), что подтверждает возможность зажигания метана микрочастицами угля.



1 – давление воздуха; **2** – давление метановоздушной смеси; **3, 4** – температура частиц в воздухе и в метановоздушной смеси; **5** – температура продуктов сгорания метана
Рисунок 5. – Изменение давления газа и температуры горящих микрочастиц в воздухе и в метановоздушной смеси

Установлены минимальные значения температур возгорания частиц угля в атмосфере воздуха – $850\pm 35\text{ К}$, воспламенения метана в гетерогенной смеси и при стехиометрическом отношении с воздухом – $1030\pm 53\text{ К}$ и $1060\pm 55\text{ К}$ соответственно (рисунок 6).

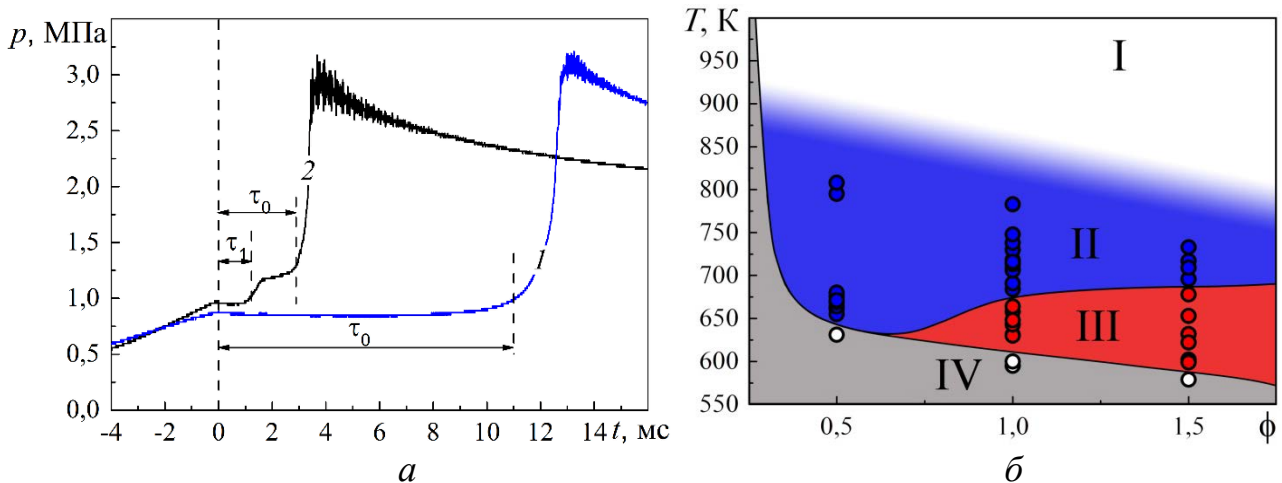
Таким образом, искусственная добавка угольных частиц размером $20\text{--}32$ мкм незначительно снижает температуру зажигания метана по сравнению с микрочастицами случайных примесей и делает процесс зажигания более устойчивым. Вместе с тем близость условий зажигания от случайных примесных и контролируемых частиц доказывает, что основным механизмом воспламенения метана в реальных установках при пониженных температурах является его вынужденное зажигание от возгоревших частиц.



1 – $d_p < 20$ мкм; 2 – $d_p = 20\text{--}32$ мкм; 3, 4 – метановоздушная смесь; 5, 6 – гетерогенная смесь; 3, 5 – воспламенение метана; 4, 6 – нет воспламенения; 7 – минимальная температура возгорания/воспламенения

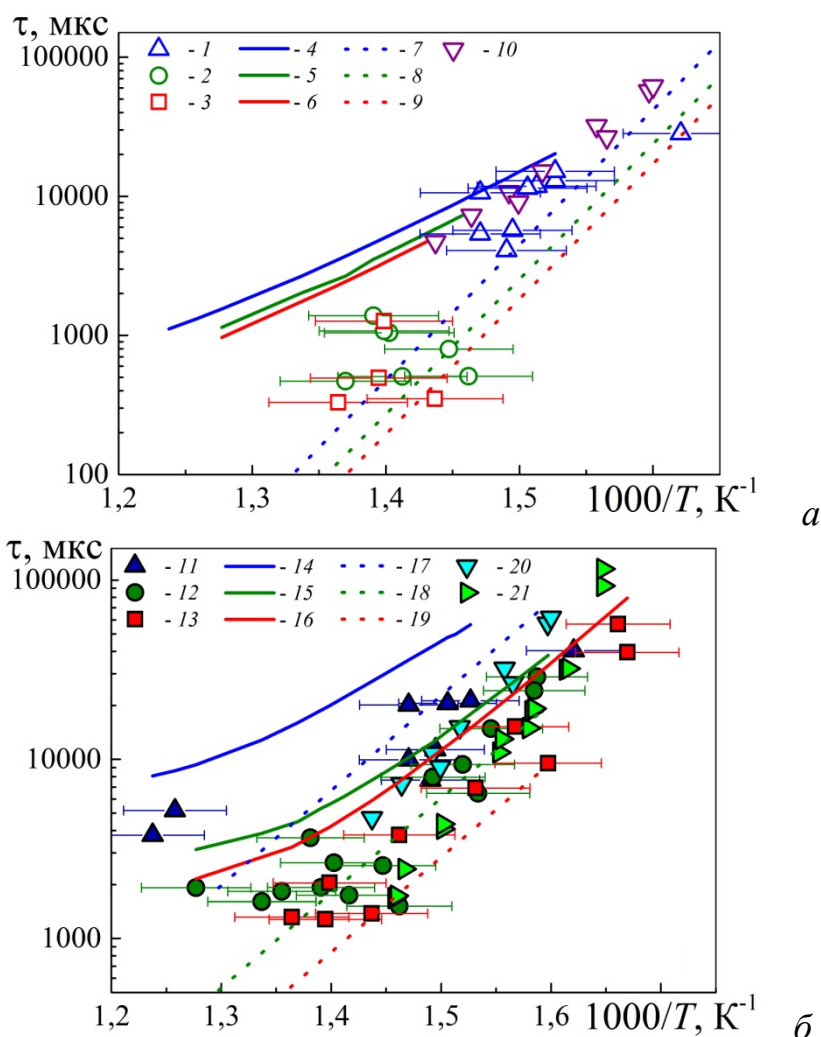
Рисунок 6. – Давление и температура газа при возгорании частиц, воспламенении метана и гетерогенной смеси в воздухе

В четвертой главе представлены результаты экспериментального исследования процессов одностадийного и двухстадийного режимов самовоспламенения (рисунок 7, а) н-декана в воздухе при быстром адиабатическом сжатии. Установлены физико-химические закономерности самовоспламенения паров н-декана при температуре 600–800 К, давлении 0,8–1,3 МПа, $\phi = 0,5\text{--}1,5$ и постоянной плотности смеси $5,0 \pm 0,5$ кг/м³.



1 – одностадийное воспламенение, 2 – двухстадийное воспламенение,
 I – воспламенение на сжатии, II – двухстадийный режим, III – одностадийный режим,
 IV – воспламенение отсутствует; символы – экспериментальные результаты
 Рисунок 7. – Давление смеси при одно- и двухстадийном самовоспламенении н-декана в воздухе (а) и параметрическая диаграмма (б) соответствующих режимов

В разделе 4.1 приведена параметрическая диаграмма (рисунок 7, б) режимов воспламенения, полученная на основании измеренного периода индукции при одностадийном (τ_0) и двухстадийном (τ_1 и τ_0) воспламенении (рисунок 8, 1–3 и 11–13).



1 – $\phi = 0,5$; 2 – $\phi = 1$; 3 – $\phi = 1,5$; 4 – $\phi = 0,5$; 5 – $\phi = 1$; 6 – $\phi = 1,5$; 7 – $\phi = 0,5$; 8 – $\phi = 1$; 9 – $\phi = 1,5$; 10 – $\phi = 0,5$; 11 – $\phi = 0,5$; 12 – $\phi = 1$; 13 – $\phi = 1,5$; 14 – $\phi = 0,5$; 15 – $\phi = 1$; 16 – $\phi = 1,5$; 17 – $\phi = 0,5$; 18 – $\phi = 1$; 19 – $\phi = 1,5$; 20 – $\phi = 0,5$; 21 – $\phi = 1$; 1–3 и 11–13 – данные настоящей работы; 4–6 и 14–16 – расчет по кинетическому механизму⁸; 7–9 и 17–19 – корреляционные уравнения⁹; 10, 20 и 21 – эксперименты на УБС¹⁰

Рисунок 8. – Сопоставление времени задержки холоднотламенной τ_1 (а) и горячей τ_0 (б) стадий самовоспламенения n-декана с литературными данными

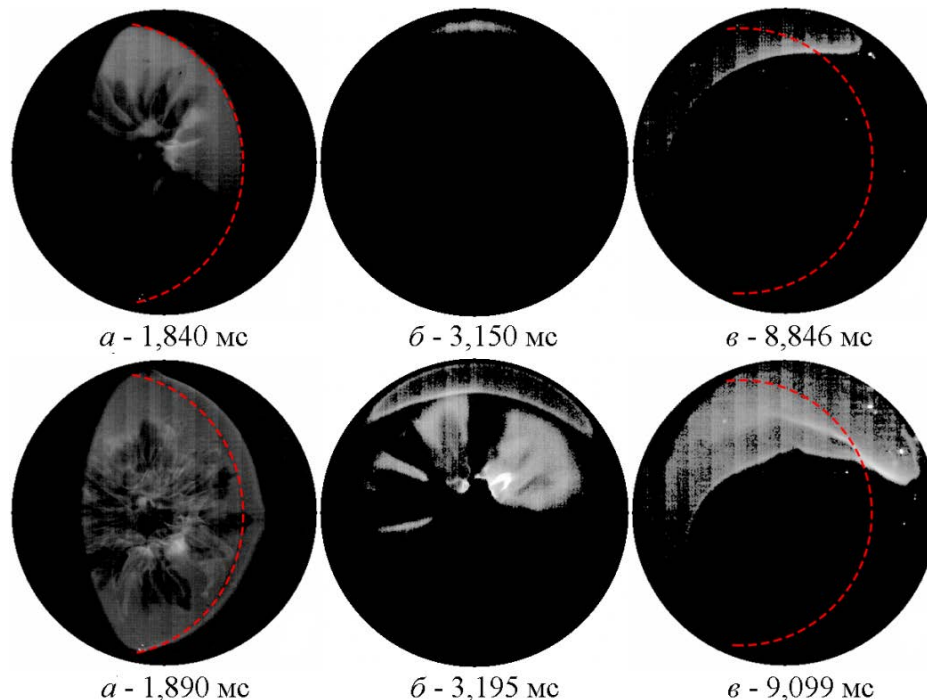
⁸ Титова, Н. С. О кинетических механизмах окисления n-декана / Н. С. Титова, С. А. Торохов, А. М. Старик // Физика горения и взрыва. – 2011. – Т. 47, № 2. – С. 3–21.

⁹ Kumar, K. Autoignition of n-decane under elevated pressure and low-to-intermediate temperature conditions / K. Kumar, G. Mittal, C. J. Sung // Combustion and Flame. – 2009. – Vol. 156, iss. 6. – P. 1278–1288.

¹⁰ Autoignition of n-decane and multi-component surrogates of kerosene in an optical rapid compression machine [Electronic resource] / C. Strozzi [et al.] // 27th Intern. Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems: proceedings of conference, Beijing, 28th July–2nd August 2019. – Mode of access: <http://www.icders.org/ICDERS2019/abstracts/ICDERS2019-349.pdf>. – Date of access: 20.04.2021.

Минимальная температура T_c , при которой происходило воспламенение паров *n*-декана в воздухе, составила: при $\phi = 0,5$ – 655 ± 19 К, $\phi = 1$ – 630 ± 18 К и $\phi = 1,5$ – 600 ± 17 К. При этом для бедной ($\phi = 0,5$) смеси двухстадийный режим наблюдается во всем диапазоне температур 655–808 К, в то время как для стехиометрической ($\phi = 1$) и богатой ($\phi = 1,5$) смесей он возникает только при температуре выше 684 ± 22 К и 696 ± 25 К соответственно. При более низких температурах наблюдается только одностадийный режим воспламенения. Минимальная температура, при которых воспламенение отсутствовало: для бедной – 630 ± 17 К, стехиометрической – 600 ± 16 К и богатой – 580 ± 15 К.

В разделе 4.2 диссертационной работы представлены результаты, позволившие установить неоднородный характер воспламенения при одностадийном и двухстадийном режимах, а также установить закономерность в расположении очагов горячей стадии для стехиометрического состава в зависимости от температуры сжатия. Обнаружено, что первые очаги горячего пламени всегда локализованы вблизи поверхности поршня при температуре более 720 К (рисунок 9, *а*). При понижении температуры (700–720 К) возможно одновременное их зарождение как вблизи поршня, так и около кварцевого окна (рисунок 9, *б*). При температурах ниже 700 К воспламенение начинается вблизи поверхности кварцевого окна (рисунок 9, *в*). Аналогичное расположение первичных очагов горения зафиксировано в бедной и богатой смесях.



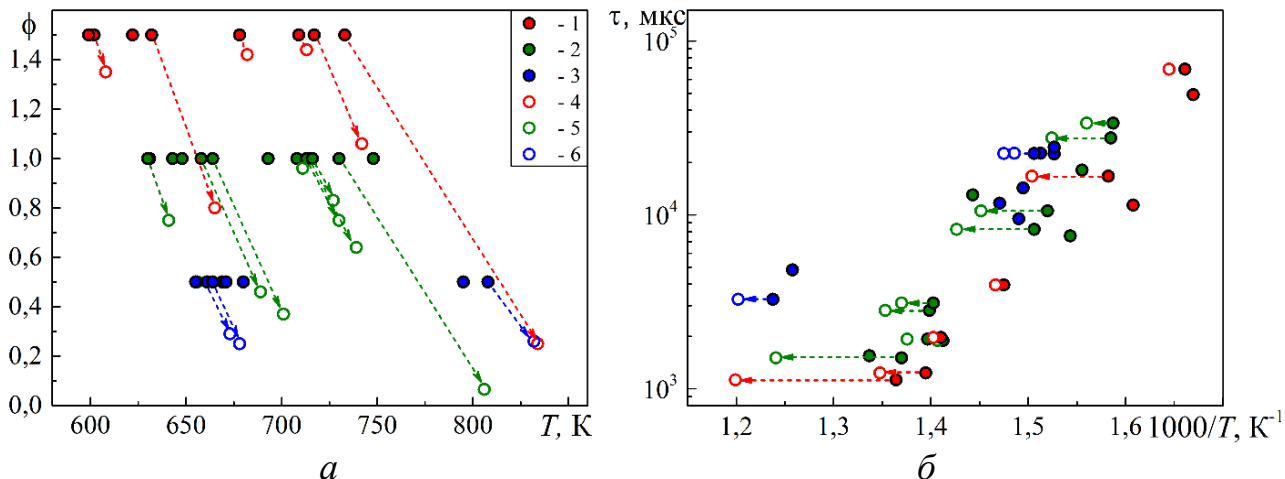
а – $T_c = 720$ К, съемка под углом 30° к оси; *б* – $T_c = 713$ К, съемка вдоль оси;
в – $T_c = 670$ К, съемка под углом 30° к оси; красная штриховая линия – граница между
 поверхностью поршня и боковой стенкой камеры сгорания

Рисунок 9. – Фотографии очагов воспламенения горячей стадии в различные моменты времени

Для визуализации холодного пламени использовалась специальная камера с электронно-оптическим усилителем яркости изображения, работающая в режиме двух последовательных кадров. Полученные кадры позволили установить, что зарождение очага холодного пламени также происходит вблизи поршня. Как и для горячей стадии (рисунок 9, *a* и *б*) характерной особенностью полученных снимков является наличие области с непрореагировавшей смесью в застойной зоне на оси вблизи поверхности поршня. Это указывает на влияние вихревого течения на распределение концентрации топлива и температуры смеси в объеме камеры сгорания, и последующие процессы инициирования как холоднотемпературной, так и горячей стадий воспламенения паров *n*-декана.

В разделе 4.3 показано, что при адиабатическом нагреве исследуемой смеси протекает процесс конденсации паров *n*-декана вблизи поверхностей стенок камеры сгорания из-за высокого отношения парциального давления паров к его давлению насыщения при температуре стенок (333 К), достигающего значений 3–16 в зависимости от эквивалентного отношения топливо–окислитель. Наличие процесса конденсации паров отражается в том, что измеренное давление p_c в конце такта сжатия в большинстве случаев больше, чем максимально возможное, рассчитанное в адиабатическом приближении процесса сжатия p_{ad} , что вызвано увеличением показателя адиабаты смеси γ из-за уменьшения концентрации паров *n*-декана в камере сгорания. Это позволило провести корректировку значения средней температуры смеси T_{eff} путем подбора «эффективного» эквивалентного отношения топливо–окислитель ϕ_{eff} , при котором выполняется превышение рассчитанного значения давления p_{ad} по сравнению с измеренным в эксперименте p_c .

На рисунке 10 представлены результаты расчета изменения эквивалентного отношения топливо–окислитель (*a*) и результаты измерения задержки самовоспламенения τ_0 бедной ($\phi = 0,5$), стехиометрической ($\phi = 1$) и богатой ($\phi = 1,5$) смесей паров *n*-декана с воздухом (*б*) при температуре 600–800 К, давлении 0,8–1,2 МПа и постоянной плотности $5 \pm 0,5$ кг/м³. Видно, что конденсация топлива приводит к существенному обеднению смеси в целом по объему (рисунок 10, *a*), что отражается на увеличении средней температуры в объеме до 100 К в богатых и на 15–25 К в бедных смесях. Рассчитанное изменение средней температуры приводит к сдвигу измеренных задержек самовоспламенения в сторону линейной аппроксимации данных, полученных на ударной трубе при высоких температурах (рисунок 10, *б*). Наблюдаемый в повторных экспериментах разброс результатов измерений может быть вызван изменениями как локальной температуры, так и эквивалентного отношения ϕ вследствие сложного характера протекания процесса конденсации и последующего объемного перераспределения топлива.



1 – $\phi = 1,5$ и T_c ; 2 – $\phi = 1$ и T_c ; 3 – $\phi = 0,5$ и T_c ; 4–6 – ϕ_{eff} и T_{eff} ; штриховая стрелка – направление сдвига

Рисунок 10. – Влияние конденсации паров н-декана на изменение эффективных эквивалентного отношения топливо–окислитель (a) и температуры смеси (b)

Таким образом, из-за явления конденсации и вихревого течения в объеме камеры сгорания возникает эффект локального обогащения смеси топливом вблизи поверхности поршня и торца камеры сгорания. Смеси воздуха с тяжелыми углеводородами, к которым относится н-декан, воспламеняются быстрее в более богатых смесях, кроме того, за счет теплоты фазового перехода локальная температура топливоздушной смеси может быть несколько повышена. Это приводит к тому, что как холоднопламенная, так и горячая стадии воспламенения инициируются быстрее и могут протекать более интенсивно вблизи поверхности поршня и торца камеры сгорания (рисунок 9). Данные процессы объясняют измеряемое в экспериментах уменьшение задержки самовоспламенения в низкотемпературном диапазоне и возникновение очагов горения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Адаптирован метод определения скорости газодинамического течения в камере сгорания, основанный на пространственно-временной фоторегистрации движения горящих угольных микрочастиц. Установлено, что измеренное время горения микрочастиц угля диаметром 20–32 мкм является достаточным для применения их для визуализации течения газа, влияющего на распределение температуры в камере сгорания [2, 6, 10].

2. Измерены радиальные компоненты скорости микрочастиц угля по радиусу камеры сгорания и установлена геометрия течения – тороидальный вихрь. Определена характерная скорость тороидального вихря 5–10 м/с в конце такта сжатия, соответствующая средней скорости движения поршня [2, 9].

3. Проведены эксперименты на установке быстрого сжатия по измерению времени задержки самовозгорания угольных микрочастиц и самовоспламенения метана в гетерогенной смеси с фиксированной плотностью газа ($5 \pm 0,5$ кг/м³) при давлениях 1,3–1,9 МПа и в диапазоне температур 800–1200 К. Установлены минимальные температуры самовозгорания микрочастиц угля диаметрами менее 20 мкм и 20–32 мкм в воздухе – 850 ± 35 К, воспламенения метана в гетерогенной смеси – 1030 ± 53 К и при стехиометрическом отношении с воздухом – 1060 ± 55 К [1, 3, 4, 7, 12].

4. Предложен доминирующий механизм воспламенения метана при температурах менее 1200 К посредством вынужденного зажигания от горящих примесных микрочастиц. Обнаружен случайный характер возникновения очага воспламенения метана в гетерогенной смеси вблизи горящих частиц угля диаметром 20–32 мкм, самовозгорание которых происходит раньше и при более низких температурах. Измерена температура горящих частиц угля в гетерогенной смеси и в воздухе с помощью фотоэмиссионного пирометра, которая составляет 2500 ± 200 К [4, 8, 11, 15].

5. Проведены эксперименты по самовоспламенению бедной ($\phi = 0,5$), стехиометрической ($\phi = 1$) и богатой ($\phi = 1,5$) n-декановоздушных смесей в диапазонах температур 600–800 К и давлений 0,8–1,3 МПа. Измерены времена задержек холоднопламенной и горячей стадий самовоспламенения n-декановоздушных смесей и определены минимальные температуры перехода от одностадийного режима к двухстадийному: для богатой – 696 ± 25 К, стехиометрической – 684 ± 22 К; в бедной смеси всегда реализовывался двухстадийный режим. Обнаружено, что холоднопламенный и горячий режимы реагирующей смеси характеризуются неоднородным очаговым самовоспламенением. Получены данные по пространственной локализации очагов горячего воспламенения при стехиометрическом отношении топливо–окислитель в зависимости от температуры: ниже 700 К – вблизи кварцевого окна, выше 720 К – вблизи поверхности поршня, в диапазоне 700–720 К – вблизи обеих поверхностей [5, 13, 14].

6. Определены минимальные температуры самовоспламенения n-декановоздушных смесей в установке быстрого сжатия: $\phi = 0,5$ – 655 ± 19 К, $\phi = 1$ – 630 ± 18 К и $\phi = 1,5$ – 600 ± 17 К; при температурах выше 800 К холоднопламенная стадия реализовывалась в процессе сжатия смесей [5, 14].

7. Установлены закономерности процесса неравновесной конденсации паров топлива в тепловом пограничном слое и тороидального вихревого движения газа над поверхностью сжимающего поршня, обеспечивающего транспорт паров к зоне конденсации, приводящие к неоднородным распределениям концентрации паров топлива и температуры смеси по объему,

росту средней температуры на 15–100 К по сравнению с расчетной, снижению эквивалентного отношения топливо–окислитель ϕ до 0,2 [5].

8. Показана необходимость тщательного анализа фактических условий измерения времени индукции паров углеводородов при использовании этих данных для верификации детальных кинетических схем химических реакций, основанная на влиянии вихревого движения газа и конденсации паров топлива на пространственно-временные характеристики процесса самовоспламенения *n*-декановоздушной смеси [5].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Предложенный способ визуализации структуры и эволюции нестационарных газодинамических течений, обладающий рядом преимуществ по сравнению с существующими методами определения: пригодность визуализации течений в реагирующих средах, простота реализации, позволяет оценить параметры таких течений с пространственно-временным разрешением, достаточным для решения задач оптимизации процессов аэродинамики и горения топливовоздушных смесей в двигателях внутреннего сгорания.

Установленные минимальные температуры самовозгорания микрочастиц угля в воздухе и воспламенения метановоздушной смеси являются одними из ключевых данных для понимания механизмов зажигания газовых смесей и горения твердых частиц и установления критериев взрыво- и пожаро-опасности.

Полученные новые знания о наблюдаемом процессе конденсации паров топлива при нагреве смеси быстрым ее сжатием и его влиянии на распределения температуры и концентрации топлива в объеме необходимы для понимания кинетики воспламенения и распространения фронта пламени и могут быть востребованы при разработке и проектировании камер сгорания двигателей и газовых турбин.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях и журналах

1. Пенязьков, О. Г. Влияние частиц угольной пыли на самовоспламенение метановоздушной смеси при температурах 800–1200 К / О. Г. Пенязьков, В. В. Лещевич, С. Ю. Шимченко // Тепло- и массоперенос–2015. – Минск : Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2016. – С. 116–120.

2. Visualization and analysis of the motion of burning particles in the combustion chamber of a rapid compression machine / V. V. Leschevich,

O. G. Penyazkov, N. A. Fomin, S. Yu. Shimchenko // *J. Flow Visual. Image Process.* – 2016. – Vol. 23, iss. 1–2. – P. 1–14.

3. Теоретическое и экспериментальное исследование химических превращений смеси метан-водород-частицы угля в установке быстрого сжатия / А. В. Федоров, Д. А. Тропин, О. Г. Пенязьков, В. В. Лещевич, С. Ю. Шимченко // *ИФЖ.* – 2017. – Т. 90, № 4. – С. 824–831.

4. Лещевич, В. В. Возгорание микрочастиц угля в атмосфере воздуха и их влияние на воспламенение метана / В. В. Лещевич, О. Г. Пенязьков, С. Ю. Шимченко // *ИФЖ.* – 2020. – Т. 93, № 4. – С. 1041–1050.

5. Лещевич, В. В. Особенности самовоспламенения паров н-декана в воздухе при температурах 600–800 К / В. В. Лещевич, О. Г. Пенязьков, С. Ю. Шимченко // *Докл. НАН Беларуси.* – 2020. – Т. 64, № 6. – С. 747–756.

Статьи в других научных изданиях

6. Лещевич, В. В. О возможности определения структуры и скорости потока газа в установке быстрого сжатия из анализа перемещения горящих частиц / В. В. Лещевич, О. Г. Пенязьков, С. Ю. Шимченко // *Горение и взрыв.* – 2015. – Т. 8, № 1. – С. 106–115.

7. Лещевич, В. В. Воспламенение метановоздушной смеси в присутствии угольной пыли при температурах 800–1200 К / В. В. Лещевич, О. Г. Пенязьков, С. Ю. Шимченко // *Горение и взрыв.* – 2016. – Т. 9, № 3. – С. 29–35.

8. The influence of coal particles on self-ignition of methane–air mixture at temperatures 950–1200 K [Electronic resource] / V. V. Leschevich, O. G. Penyazkov, S. Yu. Shimchenko, M. L. Yaumenchykau // *J. of Physics: Conference Series.* – 2016. – Vol. 774. – 6 p. – Mode of access: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/774/1/012084/pdf>. – Date of access: 20.04.2021.

Статьи в материалах научных конференций

9. Leschevich, V. V. Flow visualization in a test chamber of rapid compression machine by observation of burning particles displacement / V. V. Leschevich, O. G. Penyazkov, S. Yu. Shimchenko [Electronic resource] // *Proceedings of the 12th International Conference of Young Scientists on Energy Issues (CYSENI-2015), Kaunas, Lithuania, 27–28 May, 2015 / Lithuanian Energy Institute.* – P. 353–360. – 1 electron. opt. disc (CD–ROM).

10. Leschevich, V. V. Auto-ignition of Premixed Methane/air Mixture in the Presence of Dust [Electronic resource] / V. V. Leschevich, O. G. Penyazkov, S. Yu. Shimchenko // *Proceedings of the 25th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems (ICDERS), Leeds, UK, 2–7 August, 2015 / University of Leeds.* – 6 p. – Mode of access: <http://www.icders.org/ICDERS2015/abstracts/ICDERS2015-060.pdf>. – Date of access: 20.04.2021.

11. Лещевич, В. В. Экспериментальное исследование самовоспламенения гибридной смеси метан–воздух–угольная пыль / В. В. Лещевич, О. Г. Пенязков, С. Ю. Шимченко // IV Минский международный коллоквиум по физике ударных волн, горения и детонации: сб. докл., Минск 9–12 ноября 2015 г. / НАН Беларуси, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова; редкол.: О. Г. Пенязков и А. Д. Чорный. – Минск, 2015. – С. 131–137.

12. Leschevich, V. V. The experimental study of auto-ignition of hybrid methane/air/coal dust mixture under temperature 950–1200 K [Electronic resource] / V. V. Leschevich, O. G. Penyazkov, S. Yu. Shimchenko // Proceedings of the 13th International Conference of Young Scientists on Energy Issues (CYSENI-2016), Kaunas, Lithuania, 26–27 May, 2016 / Lithuanian Energy Institute. – P. 266–270. – 1 electron. opt. disc (CD–ROM).

13. Leschevich, V. V. A Rapid compression machine study of n-decane ignition at intermediate temperatures [Electronic resource] / V. V. Leschevich, O. G. Penyazkov, S. Yu. Shimchenko // Proceedings of the 26th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems (ICDERS), Boston, MA, USA, July 30–August 4, 2017 / Boston University. – 6 p. – Mode of access: <http://www.icders.org/ICDERS2017/abstracts/ICDERS2017-0926.pdf>. – Date of access: 20.04.2021.

14. Лещевич, В. В. Исследование воспламенения паров н-декана в воздухе при температурах 600–800 К / В. В. Лещевич, О. Г. Пенязков, С. Ю. Шимченко // VI Минский международный коллоквиум по физике ударных волн, горения и детонации: сб. докл., Минск 11–14 ноября 2019 г. / НАН Беларуси, Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова; редкол.: О. Г. Пенязков и А. Д. Чорный. – Минск, 2019. – С. 104–111.

Тезисы докладов конференций

15. The influence of coal particles on self-ignition of methane–air mixture at the temperature 950–1200 K / V. V. Leschevich, O. G. Penyazkov, S. Yu. Shimchenko, M. L. Yaumenchykau // XXXI International Conference on Equations of State for Matter : Book of Abstracts, Elbrus, Russia, 1–6 March, 2016. – Moscow & Chernogolovka & Nalchik, 2016. – P. 188.

РЕЗЮМЕ

Шимченко Сергей Юрьевич

Физико-химические процессы при самовоспламенении двухфазных топливных смесей при температурах 600–1200 К

Ключевые слова: быстрое сжатие, воспламенение, вихрь, гетерогенная смесь, двухстадийное самовоспламенение, конденсация, метан, микрочастицы угля, н-декан, отрицательный температурный коэффициент, холодное пламя.

Объект исследования: процессы аэродинамики, конденсации, воспламенения стехиометрической метановоздушной смеси в присутствии угольных микрочастиц, воспламенения паров н-декана с воздухом, возгорания и горения микрочастиц.

Предмет исследования: вихревая структура течения газа, параметры и времена задержек самовоспламенения топливовоздушных смесей, характерные времена и критические условия возгорания частиц, факторы, влияющие на процессы воспламенения.

Цель диссертационной работы: установить основные физико-химические закономерности, определяющие процессы самовоспламенения двухфазных топливовоздушных сред, содержащих угольные микрочастицы, метан и пересыщенные пары н-декана, при адиабатическом сжатии до температур 600–1200 К.

Методы исследования: физический эксперимент.

Полученные результаты и их новизна. Адаптирован метод определения распределения скоростей газодинамического течения в камере сгорания. Определены минимальные температуры возгорания угольных микрочастиц в воздухе, воспламенения метана в гетерогенной и воздушной смесях. Установлено, что горящие микрочастицы угля (20–32 мкм) являются локальными источниками случайного очагового зажигания стехиометрической метановоздушной смеси при температурах ниже 1200 К. Установлены температурно-концентрационные пределы перехода от одностадийного к двухстадийному режиму самовоспламенения н-декана в воздухе. Получена зависимость положения очага горячей стадии н-декана от температуры. Показано, что в камере сгорания протекающий процесс конденсации паров топлива приводит к существенному перераспределению концентрации и температуры смеси по объему, что предопределяет локальные особенности ее последующего самовоспламенения.

Рекомендации по использованию. Полученные результаты могут быть использованы для изучения кинетики и механизмов химических превращений, совершенствования критериев взрыво- и пожаробезопасности технологических процессов и оборудования.

Область применения: физика горения и взрыва, кинетика химических реакций, двигателестроение, химическая промышленность.

РЭЗІЮМЭ

Шымчэнка Сяргей Юр'евіч

Фізіка-хімічныя працэсы пры самазагаранні двухфазных паліўных сумесяў пры тэмпературах 600–1200 К

Ключавыя словы: хуткі сціск, узгаранне, віхор, гетэрагенная сумесь, двухстадыйнае самазагаранне, кандэнсацыя, метан, мікрасасціны вугалю, н-дэкан, адмоўны тэмпературны каэфіцыент, халоднае полымя.

Аб'ект даследавання: працэсы аэрадынамікі, кандэнсацыі, узгарання стэхіяметрычнай метанапаветранай сумесі ў прысутнасці вугальных мікрасасцін, узгаранні пару н-дэкана з паветрам, узгаранні і гарэнні мікрасасцін.

Прадмет даследавання: віхравая структура плыні газу, параметры і часы затрымак самазагарання палівапаветраных сумесяў, характэрныя часы і крытычныя ўмовы ўзгарання часцін, фактары, якія ўплываюць на працэсы ўзгарання.

Мэта дысертацыйнай работы: усталяваць асноўныя фізіка-хімічныя заканамернасці, якія вызначаюць працэсы самазагарання двухфазных палівапаветраных асяроддзяў, што змяшчаюць вугальныя мікрасасціны, метан і перанасычаныя пары н-дэкана, пры адыябатычным сціску да тэмператур 600–1200 К.

Метады даследавання: фізічны эксперымент.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Адаптаваны метады вызначэння размеркавання хуткасцяў газадынамічнай плыні ў камеры згарання. Вызначаны мінімальныя тэмпературы ўзгарання вугальных мікрасасцін у паветры, узгарання метану ў гетэрагеннай і паветранай сумесях. Усталявана, што падпаленыя мікрасасціны вугалю (20–32 мкм) з'яўляюцца лакальнымі крыніцамі выпадковага ачаговага запальвання стэхіяметрычнай метанапаветранай сумесі пры тэмпературах ніжэй 1200 К. Усталяваны тэмпературна-канцэнтрацыйныя межы пераходу ад адностадыйнага да двухстадыйнага рэжыму самазагарання н-дэкана ў паветры. Атрымана залежнасць становішча ачага гарачай стадыі н-дэкана ад тэмпературы. Паказана, што ў камеры згарання працякаючы працэс кандэнсацыі пароў паліва прыводзіць да істотнага перамеркавання канцэнтрацыі і тэмпературы сумесі па аб'ёме, што прадвызначае лакальныя асаблівасці яе наступнага самазагарання.

Рэкамендацыі па выкарыстанні. Атрыманыя вынікі могуць быць выкарыстаны для вивучэння кінэтыкі і механізмаў хімічных ператварэнняў, удаканалення крытэрыяў выбуха- і пажарабяспекі тэхналагічных працэсаў і абсталявання.

Вобласць ужывання: фізіка гарэння і выбуху, кінэтыка хімічных рэакцый, вытворчасць рухавікоў, хімічная прамысловасць.

ABSTRACT

Shimchenko Sergey Yur'evich

Physical-chemical processes during self-ignition of two-phase fuel mixtures at the temperatures 600–1200 K

Keywords: rapid compression, ignition, vortex, heterogeneous mixture, two-stage self-ignition, condensation, methane, coal microparticles, n-decane, negative temperature coefficient, cool flame.

Object of investigation: processes of aerodynamics, condensation, ignition of stoichiometric methane-air mixture in the presence of coal microparticles, ignition of n-decane in air, ignition and combustion of microparticles.

Subject of investigation: vortex structure of the gas flow, parameters and autoignition delay times of fuel-air mixtures, characteristic times and critical conditions of particle ignition, factors influencing ignition processes.

Objective of the thesis: to establish the main physical-chemical dependences that determine processes of self-ignition of two-phase fuel-air media containing coal microparticles, methane and supersaturated vapors of n-decane, at adiabatic compression to temperatures 600–1200 K.

Methods of investigation: physical experiment.

Results obtained and their novelty. A method for determining the distribution of velocities of gas-dynamic flow in the combustion chamber has been adapted. The minimum temperatures of coal microparticles ignition in the air, of ignition of methane in heterogeneous and air mixtures, have been determined. It was established that burning coal microparticles (20–32 μm) are local sources of random focal ignition of a stoichiometric methane-air mixture at temperatures below 1200 K. The temperature and concentration limits of the transition from one-stage to two-stage autoignition for n-decane in the air have been determined. The temperature dependence of the n-decane hot spot position was obtained. It is shown that the condensation process of fuel vapor in the combustion chamber leads to a significant redistribution of the vapor concentration and temperature of the mixture into the volume, which predetermines the local features of its subsequent autoignition.

Recommendations for use.

The results obtained can be used for studying the kinetics and mechanisms of chemical reactions, for improving of explosion and fire safety criteria of technological processes and equipment.

Application field: combustion and explosion physics, kinetics of chemical reactions, propulsion engineering, chemical industry.

Научное издание

Шимченко Сергей Юрьевич

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
ПРИ САМОВОСПЛАМЕНЕНИИ ДВУХФАЗНЫХ
ТОПЛИВНЫХ СМЕСЕЙ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ
600–1200 К**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

по специальности

01.04.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных
состояний веществ

Подписано в печать 01.07.2021.

Формат 60×84 1/16. Бумага офисная.

Гарнитура Times New Roman.

Усл. печ. л. 1,51. Уч.-изд. л. 1,77.

Тираж 80 экз. Заказ 20.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси.

Свидетельство о государственной регистрации издателя,

изготовителя, распространителя печатных изданий

№ 1/275 от 04.04.2014.

ЛП № 02330/451 от 18.12.2013.