

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
ИНСТИТУТ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА им. А. В. ЛЫКОВА
Журнал основан в январе 1958 г.

ИФЖ

И
НЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

JOURNAL
OF ENGINEERING PHYSICS
AND THERMOPHYSICS

Отдельный оттиск
Offprint

Том 98, № 1

Vol. 98, No. 1

ЯНВАРЬ–ФЕВРАЛЬ

JANUARY–FEBRUARY

2025

ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в январе 1958 г.

2025. ТОМ 98, № 1 (ЯНВАРЬ–ФЕВРАЛЬ)

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ТЕПЛООБМЕН В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

- Макаров М. В., Яньков Г. Г., Артемов В. И.** Численное исследование неустойчивости опускного течения ртути в неравномерно обогреваемой круглой трубе под воздействием поперечного магнитного поля..... 3
- Макаров С. С., Липанов А. М., Карпов А. И., Альес М. Ю.** Численное моделирование сопряженного теплообмена при охлаждении высокотемпературного металлического цилиндра потоком газожидкостной среды..... 20
- Гриднев М. А., Хмыров Р. С., Гусаров А. В.** Математическое моделирование кинетики кристаллизации объемного металлического стекла при селективном лазерном плавлении..... 27
- Садикова Е. В., Плетнев А. А., Сидоров В. Г.** Расчет температурного состояния твэлов в бассейне выдержки энергоблока № 4 Белоярской АЭС при запроектных авариях..... 38
- Маршалова Г. С., Сухоцкий А. Б., Островская Д. В., Данильчик Е. С.** Экспериментальное исследование влияния внешнего загрязнения на теплоотдачу однорядного теплообменного пучка из круглорбристых труб в условиях интенсифицированной свободной конвекции 46
- Копылов П. С., Копылов С. Н., Елтышев И. П., Пехотиков А. В.** Оценка поведения огнезащитных покрытий в поле температур от -162 до $+1300^{\circ}\text{C}$, формирующегося при авариях с участием сжиженного природного газа 54
- Васильев Л. Л., Журавлёв А. С., Гракович Л. П., Рабецкий М. И., Драгун Л. А.** Двухфазные устройства для терморегулирования теплонагруженных компонентов электротранспорта 62
- Попова Д. К., Кортиков Н. Н.** Суррогатное моделирование для оптимизации рабочего процесса в турбинной ступени 74
- Ризаханов Р. Н.** Кристаллизация частиц малых размеров 84
- Мадышев И. Н., Дмитриева О. С.** Экспериментальное исследование тепловых характеристик сухого блока оросителя градирни..... 91
- Валуева Е. П., Морозов Е. А.** Решение задачи Стефана для квазистационарных колебаний температуры окружающей среды 101
- Теймурханов А. Т., Товарных Г. Н.** Определение напряжений в стенках канала солнечного водонагревателя при замерзании воды 110
- Yang Kai, Wu Hao, Pang Lei, Lv Pengfei, and Shen Jing.** Effect of Room Size on External Explosion Induced by Vented Natural Gas Explosion 116

ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОС В ПРОЦЕССАХ ГОРЕНИЯ

- Дорохов В. В., Романов Д. С., Стрижак П. А.** Композиционные жидкие топлива: экологические, энергетические, технико-экономические аспекты 126
- Кривошеев П. Н., Кисель Ю. С., Скилонд А. В., Авсюкевич К. П., Тереза А. М., Пенязьков О. Г.** Воспламенение бедных смесей водород–воздух–пары воды за ударными волнами 138
- Федорова Т. А., Пашкевич Д. С., Попов П. А., Талалов В. А.** Численное исследование влияния способа подачи реагентов в реактор на взаимодействие гексафторида урана с метаном и кислородом в режиме горения..... 145
- Пашкевич Д. С., Зимин А. Р., Алексеев Ю. И., Мухортов Д. А., Камбур П. С., Петров В. Б., Баженов Д. А., Капустин В. В., Смолкин П. А., Федорова Т. А.** Получение фторида водорода при взаимодействии обедненного гексафторида урана с метаном и кислородом в режиме горения..... 154

Ашихмин А. Е., Пискунов М. В., Стрижак П. А. Мультикритериальный анализ характеристик изготовленного в наномембранном реакторе биотоплива.....	163
---	-----

ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОС В ДИСПЕРСНЫХ И ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

Евдокименко И. А., Лобанов П. Д., Чинак А. В., Филиппский К. А., Si-Ahmed E.-K., Gentric S., Blel W., Legrand J. Исследование гидродинамической структуры двухфазного пузырькового отрывного течения и теплообмена в прямоугольном канале с одиночной преградой.....	174
Дорняк О. Р., Кошелева М. К., Мешалкин В. П. Математическое моделирование процесса конвективной сушки хлопчатобумажной ткани.....	183
Ахметов А. Т., Гималтдинов И. К., Мухаметзянов А. Ф. Выявление условий формирования пиков давления в зондирующем импульсе.....	190

ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ

Соколов А. С., Степахин В. Д., Скворцова Н. Н., Борзосексов В. Д., Гаянова Т. Э., Козак А. К., Вагапова Н. Т., Бадурин И. В., Логинова Е. С., Образцова Е. А., Колик Л. В., Конькова А. С., Кончечков Е. М., Гусейн-заде Н. Г. Имитационные эксперименты по осаждению частиц реголита lms-1d в гиротронном разряде и их воздействию на солнечные панели космических аппаратов.....	197
Шорсткий И. А. Взаимодействие плазменного канала искрового разряда с подвешенной каплей воды.....	205

ГИДРОГАЗОДИНАМИКА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Егоров И. В., Пальчиковская Н. В. Численное моделирование нелинейной стадии ламинарно-турбулентного перехода в сверхзвуковом пограничном слое при наличии акустических возмущений.....	214
Митрофанова О. В., Поздеева И. Г., Старовойтов Н. А. Экспериментальные исследования устойчивой формы вихревой структуры закрученного течения.....	218
Левченя А. М., Галаев С. А., Рис В. В. Влияние числа Прандтля на интенсификацию теплообмена при развитом турбулентном течении в канале с одной ребренной стенкой.....	229
Панкратов Е. В. Образование вторичных вихрей в кольцевом канале с неподвижными поверхностями при закрутке потока в нем.....	238

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Харламова И. М., Коробко Е. В., Маркова Л. В. Исследование коэффициента теплопроводности электрореологической жидкости при изменении внешних электрического и температурного полей.....	248
Кирсанов Ю. А. Тепловая релаксация и теплопроводность твердого тела.....	255
Boumhaout M., Boukhattem L., and Hamdi H. Thermophysical Characterization of Composite Materials Based on Moroccan Date Palm Fibers with Hot Wire and Hot Plane Methods.....	263

ОБЗОРЫ

Сухановский А. Н., Васильев А. Ю., Гаврилов А. А., Евграфова А. В., Попова Е. Н. Конвективный теплоперенос в крупномасштабных природных системах.....	273
--	-----

Ответственный за выпуск: Л. Н. Шемет

Подписано в печать 03.01.2025. Формат 60×84¹/₈. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 32,2. Уч.-изд. л. 29,71. Тираж 52 экз. Заказ № 2

Отпечатано в Республиканском унитарном предприятии "Издательский дом "Беларуская навука".
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий №1/18 от 02.08.2013.
ЛП № 02330/455 от 30.12.2013.

220141, г. Минск, ул. Ф. Скорины, 40

© Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси

УДК 536.46

П. Н. Кривошеев¹, Ю. С. Кисель¹, А. В. Скилонд¹, К. П. Авсюкевич^{1,2}, А. М. Тереза³, О. Г. Пенязков¹

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ БЕДНЫХ СМЕСЕЙ ВОДОРОД–ВОЗДУХ–ПАРЫ ВОДЫ ЗА УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

Экспериментально исследовано воспламенение бедных смесей водорода с воздухом и парами воды за отраженными ударными волнами в диапазоне температур 947–1552 К и давлении 1 атм. Выполнено численное моделирование профилей концентрации электронно-возбужденного радикала OH^ с использованием нескольких широко используемых детальных кинетических механизмов. Показано, что влияние воды на самовоспламенение бедных водородно-воздушных смесей при температуре выше 1050 К несущественно. Расхождение между расчетами и экспериментальными данными при температуре ниже 1050 К объясняется наличием малых примесей, образующихся в каталитических реакциях на поверхности.*

Ключевые слова: задержка воспламенения, ударная труба, ударная волна, смесь водорода с воздухом и парами воды, детальный кинетический механизм, химическая кинетика, численное моделирование.

Введение. В последнее время наблюдается неуклонный рост спроса на безуглеродные энергоносители, такие как водород и топливо на его основе. С одной стороны, преимущества очевидны — это чистота продуктов окисления (сгорания) водорода и чрезвычайно высокая удельная теплота, выделяемая при этом, которая в несколько раз превышает таковую для углеводородных топлив как газообразных, так и жидких (120–140 МДж/кг — для водорода, 35 МДж/кг — для природного газа, около 50 МДж/кг — для метана, 47–48 МДж/кг — для бензина и т. д.) [1]. С другой стороны, высокая реакционная способность, широкий диапазон концентрационных пределов распространения пламени (от 4 до 80% по составу), низкая энергия воспламенения водородно-воздушных смесей (около 17 мкДж), а также склонность к переходу от медленного горения к детонации в совокупности означают, что использование водорода на практике связано с серьезной пожаро- и взрывоопасностью при малейшей его утечке [2–6].

Помимо аспектов, связанных с целенаправленным использованием водорода в качестве энергоносителя, существует отдельная задача обеспечения водородной пожаро- и взрывобезопасности на атомных электростанциях (АЭС). Эта проблема носит всеобъемлющий характер, поскольку риск воспламенения или взрыва водородно-воздушных смесей различной интенсивности возможен при различных режимах эксплуатации станции [7, 8].

Спецификой прогноза тяжелых аварий и оценки их последствий является принципиальная невозможность как проведения натуральных крупномасштабных экспериментов, так и прямого переноса результатов лабораторных испытаний на реальные условия развития чрезвычайной ситуации. Данные немногочисленных экспериментов подобных исследований имеют, по сути, оценочный характер предельных параметров взрывных процессов [9]. В связи с этим возрастает роль вычислительного эксперимента и повышаются требования к качеству численного моделирования физических явлений. При этом важную роль играют химические схемы окисления водорода, так называемые детальные кинетические механизмы (ДКМ). Они представляют собой подробнейшее описание процесса превращения исходных реагентов в продукты, включающее в себя как можно более полное отображение реакций, состава и свойств промежуточных веществ, переходных состояний, а также констант скоростей реакций. Валидация каждого ДКМ проходит посредством сравнения результатов численного моделирования с экспериментальными данными и подбора параметров констант скорости элементарных реакций.

¹Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси. 220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 15; э-почта: krivosheyev.pavlik@gmail.com; ²Университет Национальной академии наук Беларуси. 220070, г. Минск, ул. Радиальная, 38Б; ³Федеральный исследовательский центр химической физики имени Н. Н. Семенова РАН. 119991, г. Москва, ул. Косыгина, 4. Поступила 20.08.2024.

Одним из ключевых параметров, используемых для сравнения результатов моделирования и эксперимента, является задержка воспламенения смеси или же период индукции τ .

Несмотря на то, что воспламенение и горение водорода активно изучалось на протяжении многих лет, в литературе, за редким исключением [10], отсутствуют экспериментальные данные о воспламенении ультрабедных и бедных по составу (менее 10% по объему) смесей водорода с воздухом. При этом воспламенение указанных смесей представляет значительный интерес с точки зрения обеспечения пожаро- и взрывобезопасности при эксплуатации объектов водородной энергетики и атомных электростанций с водоохлаждаемыми реакторами.

Хорошо известно, что одним из способов, снижающих негативные последствия от неконтролируемого воспламенения и горения смесей водорода с воздухом, является снижение концентрации горючего и окислителя в смеси путем добавления инертных добавок [2, 11], например, воды. Однако данные по задержкам воспламенения в смесях водорода с парами воды при высоких давлениях [12, 13] в литературе встречаются крайне редко.

Задача настоящего исследования заключалась в получении надежных экспериментальных данных по задержкам воспламенения в смесях водорода с воздухом и парами воды при нормальном давлении, а также оценки возможностей популярных детальных кинетических механизмов по прогнозированию таких задержек.

Экспериментальная установка. Измерения задержки воспламенения проводились в цилиндрической ударной трубе (УТ) диаметром 76 мм и длиной 6.5 м за отраженной ударной волной. Параметры смеси после прохождения отраженной ударной волны рассчитывались на основании известных начальных значений температуры и давления, а также измеренной скорости падающей ударной волны. На рис. 1 приведена схема измерительной секции ударной трубы, указаны характерные сечения и расстояния между ними, использованные для расчета скорости падающей ударной волны. Каждое измерительное сечение, включая расположенное в торце трубы, оснащено быстродействующими датчиками давления РСВ Piezotronics (модели 113b24 и 113b26) и ионизационными датчиками. Свечение реакции регистрировалось фотоэлектронными умножителями (ФЭУ). Временное разрешение и линейность характеристик ионизационных датчиков проверялись замыканием на сопротивление определенного значения, а ФЭУ — светом светодиодов в импульсном режиме. Временное разрешение для ФЭУ равно 0.6 мкс, ионизационных датчиков — 0.15 мкс. Регистрация сигналов осуществляется с частотой 10 МГц.

Фланец трубы выполнен из органического стекла СО-95. Пропускание ультрафиолетового излучения на длине волны 309 нм для него составляет 20%. Со стороны торца трубы производилась регистрация хемилюминесценции перехода ($A^2\Sigma - X^2\Pi$), характерного для возбужденного промежуточного радикала OH^* . Свет от реагирующей смеси собирался из объема измерительной секции при помощи линзы с фокусным расстоянием $F = 500$ мм, которая выполнена из стекла КУ-1 с низкими люминесцирующими свойствами. Фокусировка параллельного пучка света из объема осуществлялась на диафрагму ФЭУ. Диафрагма на ФЭУ имеет диаметр 2 мм (рис. 1). На ФЭУ установлен узкополосной светофильтр 309BP1.5 № 210898 (Omega, США) с центром 309 нм и шириной на полувысоте контура пропускания 1.5 нм.

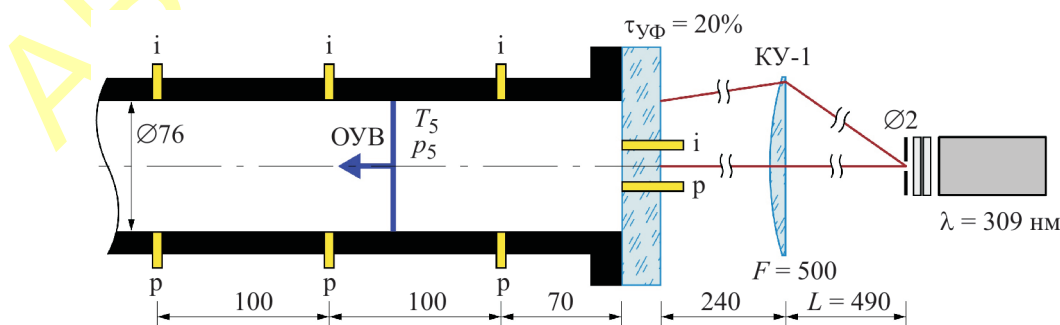


Рис. 1. Измерительная секция ударной трубы и оптическая схема: i — ионизационные датчики; p — датчики давления. Размеры указаны в мм

Самовоспламенение исследуемой газовой смеси и измерение времени индукции происходило за отраженной от торца измерительной секции ударной волной. Все эксперименты выполнялись при постоянной плотности за отраженной ударной волной для получения корректной температурной зависимости времени индукции от энергии активации смеси и концентраций топлива и окислителя. Это означает, что концентрации водорода, кислорода, азота и воды за отраженной ударной волной поддерживались практически постоянными в индукционном периоде в каждом сечении ударной трубы для всего исследуемого температурного диапазона.

За "нулевой отсчет" времени при определении задержки воспламенения принималось время прихода падающей ударной волны на торцевой отражающий фланец, определяемое по осциллограмме датчика давления, вмонтированного в указанный фланец.

Времена индукции по свечению определялись следующим образом. Поскольку излучение собиралось из всего объема трубы, итоговый сигнал свечения был интегральным по времени, свечение из каждого следующего объема реагирующей смеси (поперечного сечения трубы) накладывалось и суммировалось с предыдущим. Из-за низкой светимости регистрируемой реакции сигналы фотоумножителя были сильно зашумлены, что вносило существенную погрешность в результаты измерения величины задержки воспламенения напрямую, например, по началу роста или по пику исходного сигнала. Для более корректного измерения задержки воспламенения применялась следующая процедура. Первоначально производилось сглаживание исходных сигналов с применением быстрого преобразование Фурье. При этом использовались фильтры, эффективно пропускающие частотный спектр сигнала ниже некоторой частоты и подавляющий частоты сигнала выше этой же частоты. Для каждого сигнала указанные граничные частоты подбирались индивидуально, в зависимости от вида конкретного сигнала и соотношения сигнал–шум на нем. После сглаживания исходного сигнала функцией дифференцирования рассчитывалась первая производная. Для нахождения времени самовоспламенения на графике дифференцированного сигнала отмечалось первое значение максимума. В случае интегрированного сигнала, регистрируемого с торца УТ, максимум свечения в поперечном сечении будет соответствовать точке максимального роста интегрируемого сигнала.

Подготовка смеси с парами воды и проведение исследований. Исследовалось воспламенение следующих составов: 4.45% H_2 + 14.82% O_2 + 55.73% N_2 + 25% H_2O и 7.13% H_2 + 14.26% O_2 + 53.61% N_2 + 25% H_2O , т. е. бедных ($\varphi = 0.15$ и $\varphi = 0.25$ соответственно, где φ — эквивалентное соотношение) смесей водорода с воздухом и 25% паров воды.

Ударная труба и ее измерительная секция были обернуты ленточными нагревательными элементами и утеплены теплоизоляцией. Со стороны торца, где расположено смотровое окно с датчиками давления и тока ионизации, теплоизоляция на время проведения эксперимента кратковременно снималась. Вдоль трубы для каждого нагревательного контура устанавливался отдельный термометр для контроля температуры. Каждый нагревательный контур подключался к сети через лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) для настройки скорости нагрева.

Смеси водорода с синтетическим воздухом (кислород и азот) готовились заранее в отдельных баллонах манометрическим способом и выдерживались перед использованием не менее суток. Непосредственно приготовление смеси с парами воды осуществлялось в камере предварительного смешения, представляющей собой емкость из нержавеющей стали объемом 18 литров, внутри которой находились стальные шары для интенсификации процессов перемешивания газовой смеси. Камера была теплоизолирована, оснащена системой нагрева на основе ленточных нагревательных элементов, подключенных к источнику ЛАТР, и системой контроля температуры. Соединительные магистрали и запорная арматура между камерой смешения и секцией низкого давления ударной трубы также имели систему нагрева и были теплоизолированы.

Процедура приготовления смесей с водой выглядела следующим образом. Камера смешения в течение 4–5 часов нагревалась до температуры 60–70°C, затем вакуумировалась. Далее с использованием мерной пипетки объемом 2 мл ГОСТ 20292-74 2КЛЮ с ценой деления 0.02 мл в камеру смешения подавалась

вода (порядка 1.2–1.3 мл). Парциальное давление водяных паров при этом контролировалось по вакуумметру на 100 кПа со шкалой на 250 делений классом точности 0.4. Убедившись, что вода внутри камеры смешения полностью испарилась и конденсация на внутренних поверхностях отсутствует, следом подавали уже готовую смесь водорода с воздухом. Контроль давления при этом также осуществлялся по вакуумметру. Далее смесь выдерживалась в течение суток, при этом периодически осуществлялся наклон камеры смешения в разные стороны для того, чтобы находящиеся внутри шары могли свободно кататься по объему камеры, ускоряя таким образом процесс перемешивания компонентов газовой смеси.

Перед напуском смеси с парами воды ударная труба нагревалась до температуры 30°C в течение 3–4 часов, ее камера низкого давления вакуумировалась. В камеру подавалась вода без реагирующей смеси, осуществлялся контроль отсутствия конденсации на внутренних поверхностях трубы и проверка максимального давления насыщенных паров воды. Затем камера низкого давления вакуумировалась повторно, в нее подавалась готовая смесь с парами воды при необходимом начальном давлении, после чего проводился эксперимент.

Попытаемся оценить возможное уменьшение концентрации молекул воды в объеме, связанное с возможным осаждением части молекул на поверхности трубы, что может изменить состав смеси по сравнению с исходным и, как следствие, повлиять на результат эксперимента. Для этого определим максимальную скорость физической адсорбции, используя наибольшее число столкновений с поверхностью, определяемое уравнением Герц–Кнудсена (Hertz–Knudsen equation) [14]:

$$Z = n\langle v \rangle l / 4 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1},$$

где $\langle v \rangle$ — средняя скорость молекул молекулярной массы M при температуре T и равна $\langle v \rangle = (8RT/\pi M)^{0.5}$ см/с. Учитывая, что $n = p/kT$ при условии, что давление в смеси при напуске составляло порядка $P \sim 1000$ Па и $M = 18$ г/моль, получаем значение $Z = 3.6 \cdot 10^{25} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Количество активных адсорбирующих центров, согласно [14], максимально может составлять порядка 10^{15} . Соответственно, скорость адсорбции будет порядка $\sim 3.6 \cdot 10^{10}$ молекул $\cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Внутренняя площадь трубы составляет $\sim 1.55 \cdot 10^4 \text{ см}^2$. Таким образом, за 1 мин на эту площадь максимально может адсорбироваться $3.5 \cdot 10^{16}$ молекул. При объеме в $V \sim 3 \cdot 10^4 \text{ см}^3$ количество молекул равно $N = PV/kT \sim 7 \cdot 10^{21}$. Легко видеть, что за 1 мин, пока смесь находится в камере низкого давления, доля молекул воды, адсорбированной на поверхности, будет незначительной от общего их числа в газовой фазе. Хемосорбция на поверхности ударной трубы, сделанной из нержавеющей стали, еще меньше [14]. Конденсация воды в жидкую фазу также незначительна, поскольку точка росы при атмосферном давлении ниже 19°C.

Возможное влияние колебательной релаксации молекулярного водорода, кислорода и азота при наших условиях пренебрежимо мало, поскольку вода является прекрасным релаксантом и за несколько столкновений достигается равновесие между поступательной и колебательной температурами [15].

Моделирование. Математическое моделирование проводилось с помощью программного модуля CHEMKIN-Pro, входящего в пакет ANSYS (Academic version). Так как в экспериментах регистрировался сигнал эмиссии электронно-возбужденного радикала OH^* , из множества доступных в литературе механизмов были выбраны те ДКМ [10, 16–18], в которых содержатся блоки реакций с участием данного радикала.

Задержка воспламенения τ для каждой температуры определялась по максимальному значению мольной доли электронно-возбужденного радикала OH^* при условии $V = \text{const}$.

Результаты и их обсуждение. На рис. 2 представлены результирующие зависимости задержки воспламенения от обратной температуры для бедных $\phi = 0.15$ (а) и $\phi = 0.25$ (б) смесей водорода с воздухом в присутствии 25% паров воды в диапазоне температур 947–1552 К и давлении за отраженной волной 1 атм. Там же представлено сравнение результатов экспериментов с результатами моделирования по выбранным и упомянутым выше ДКМ.

Видно, что все использованные кинетические механизмы качественно очень хорошо описывают результаты эксперимента в диапазоне температур выше 1050 К. При этом результаты расчета близки

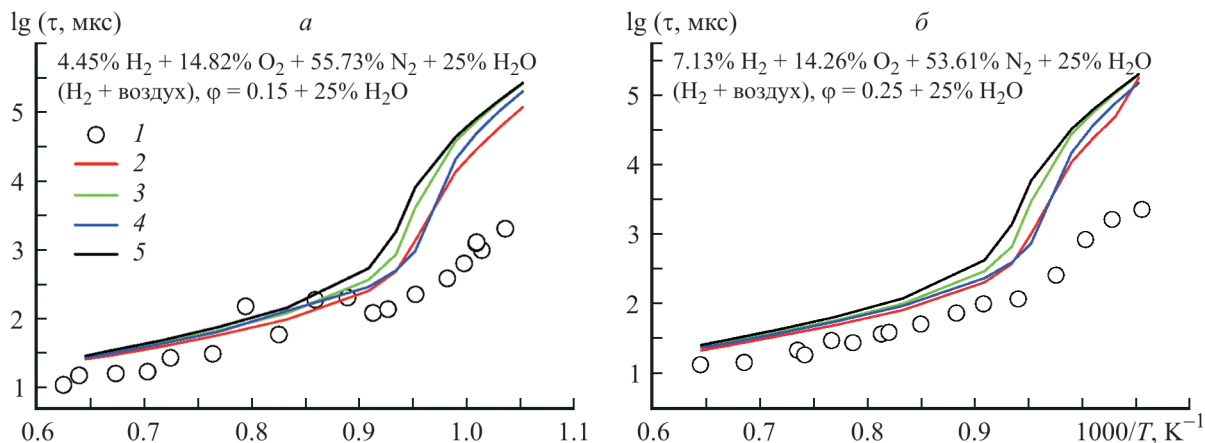


Рис. 2. Зависимость задержки воспламенения от обратной температуры для бедных смесей водорода с воздухом и парами воды в диапазоне температур 947–1552 К и давлении за отраженной волной 1 атм при $\phi = 0.15$ (а) и $\phi = 0.25$ (б): 1 — экспериментальные данные; 2–5 — моделирование по механизмам [10, 16–18] соответственно

между собой и демонстрируют хорошее (в пределах 0.3–0.4 по порядку величины) совпадение с экспериментальными данными. Однако в области температур ниже 1050 К наблюдается значительное, до 2 порядков по величине, расхождение между результатами расчетов и эксперимента.

Чтобы оценить, может ли влиять адсорбция на описание зависимости $\tau(T)$ при температуре ниже 1050 К, было проведено численное моделирование с учетом возможной конденсации воды на стенки трубы и всех коммуникаций установки в процессе подготовки смеси, перемешивания и напуска. Для этого рассматривалось сравнение расчетных зависимостей $\tau(T)$ в смесях с 0, 15 и 25% воды с экспериментальными данными для смеси 7.13% H_2 + 14.26% O_2 + 53.61% N_2 + 25% H_2O ($\phi = 0.25$). Расчеты были проведены с использованием ДКМ [10]. Результаты представлены на рис. 3.

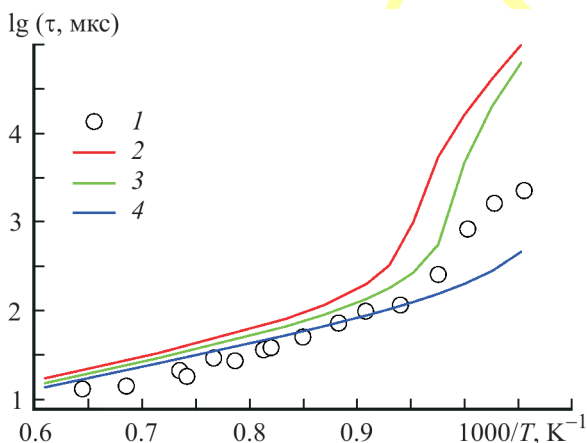


Рис. 3. Зависимость задержки воспламенения от обратной температуры для бедных ($\phi = 0.25$) смесей водорода с воздухом и парами воды в диапазоне температур 947–1552 К и давлении за отраженной волной $P_0 = 1$ атм: 1 — экспериментальные данные, смесь 25% H_2O ; 2 — расчет, смесь 25% H_2O ; 3 — расчет, смесь 15% H_2O ; 4 — расчет, смесь 0% H_2O

По рис. 3 видно, что все три расчетные кривые при температурах выше 1100 К фактически очень близки между собой, тем самым показывая, что влияние воды на формирование значения τ в этих температурах не сказывается. В то же время расчет для смеси без наличия воды при $T_0 < 1000$ К располагается ниже, чем в эксперименте, тем самым показывая, что присутствие воды удлиняет задержку воспламенения при этих температурах. Расчет с наличием 15% H_2O неплохо совпадает с экспериментом при $T_0 > 1000$ К, но, как и в случае 25% H_2O , при низких температурах предсказывает заведомо более высокое значение τ . Таким образом, уменьшение доли воды в смеси с 25 до 15% все равно не сильно помогает в описании экспериментально наблюдаемого значения τ . Выше было показано, что обычная адсорбция на стенках в наших условиях не способна значительно сократить количество воды. Таким образом, остается единственное объяснение расхождений

расчетов с экспериментальными данными. Это каталитические реакции на поверхности. В работах [19–21] показано, что при нагревании реактора вблизи поверхности водородно-кислородная смесь способна образовывать перекись в количестве нескольких торр. При наличии активных центров и связанных с ними гидроксильных групп в дальнейшем могут образовываться и другие атомы и радикалы [22, 23]. Численный анализ влияния примесей на формирование τ в бедных водородно-воздушных смесях [24] показывает, что H_2O_2 в количестве нескольких сотен *ppm* значительно сокращает задержку воспламенения как раз при температуре ниже 1000 К. Причем это сокращение аналогично снижению воды с 25 до 15% на рис. 3. Таким образом, можно сделать вывод, что неконтролируемое образование малых по количеству примесей при подготовке водородно-воздушных смесей с водой способно сокращать значение τ при $T_0 < 1000$ К, что и наблюдается на рис. 3.

Заключение. В представленном исследовании посредством высокочувствительной торцевой методики регистрации эмиссии радикала OH^* на экспериментальной установке типа ударная труба удалось экспериментально получить надежные значения задержки воспламенения τ для бедных смесей водорода с воздухом и парами воды в диапазоне температур от 947 до 1552 К при начальном давлении 1 атм за отраженными ударными волнами. Проведенное численное моделирование сигналов OH^* с использованием различных независимых кинетических механизмов, представленных в литературе, показало хорошее соответствие (как количественное, так и качественное) экспериментально наблюдаемых и расчетных значений τ в диапазоне температур выше 1050 К. В области температур 947–1050 К наблюдается значительное, до 2 порядков по величине, расхождение результатов расчетов и эксперимента. Последнее можно объяснить наличием примесей, образующихся на поверхности в результате каталитических реакций.

Настоящее исследование частично выполнено в рамках договора № 87/21 (2021) с Департаментом ядерной и радиационной безопасности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь (Госатомнадзор).

Литература

1. **Hu Qingchun, Zhang Xihong, Hao Hong.** A review of hydrogen-air cloud explosions: The fundamentals, overpressure prediction methods, and influencing factors. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2023. Vol. 48, Issue 36. Pp. 13705–13730; doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.302.
2. **Смыгалина А. Е., Киверин А. Д.** Самовоспламенение водорода при его истечении под высоким давлением в канал, заполненный кислородом с нейтральными добавками. *Химическая физика*. 2021. Т. 40, № 8. С. 49–55.
3. **Яковенко И. С., Медведков И. С., Киверин А. Д.** Структура и динамика фронта горения обедненной водородно-воздушной смеси в проточном реакторе. *Химическая физика*. 2022. Т. 41, № 3. С. 85–90.
4. **Сумской С. И., Софьин А. С., Зайнетдинов С. Х., Лисанов М. В., Агапов А. А.** Влияние загроможденности пространства на параметры взрывных волн при сгорании водородно-воздушных облаков. *Химическая физика*. 2023. Т. 42, № 3. С. 63–69; doi: 10.31857/S0207401X23030159.
5. **Домашенко А. М., Степанов А. В.** Взрывопожароопасность при создании и эксплуатации промышленных систем получения, хранения и транспортирования жидкого водорода. Методы обеспечения защиты. *Вести газовой науки*. 2022. Т. 51, № 2. С. 211.
6. **Коробцев С. В., Фатеев В. Н., Самсонов Р. О., Козлов С. И.** Безопасность водородной энергетики. *Транспорт на альтернативном топливе*. 2008. № 5 (5). С. 68.
7. **Bentaib Ahmed, Meynet Nicolas, Bleyer Alexandre.** Overview on hydrogen risk research and development activities: Methodology and open issues. *Nucl. Eng. Technol.* 2015. Vol. 47, Issue 1. Pp. 26–32; doi: 10.1016/j.net.2014.12.001.
8. **Кириллов И. А., Харитонова Н. Л., Шарафутдинов Р. Б., Хренников Н. Н.** Обеспечение водородной безопасности на атомных электростанциях с водоохлаждаемыми реакторными установками. Современное состояние проблемы. *Ядерная и радиационная безопасность*. 2017. № 2 (84). С. 1–12.
9. **Grune J., Sempert K., Haberstroh H., Kuznetsov M., Jordan T.** Experimental investigation of hydrogen–air deflagrations and detonations in semi-confined flat layers. *J. Loss Prev. Process Ind.* 2013. Vol. 26, Issue 2. Pp. 317–323; doi: 10.1016/j.jlp.2011.09.008.
10. **Krivoshcheyev Pavel, Kisel Yuliya, Skilandz Alexander, Sevrouk Kirill, Penyazkov Oleg, Tereza Anatoly.** Ignition delay of lean hydrogen–air mixtures. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 66. Pp. 81–89; doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.03.363.
11. **Азатян В. В., Сайкова Г. Р., Балаян Г. В., Пугачев Д. В.** Зависимость воспламеняемости водородно-воздушных смесей от химических и физических свойств примесей. *Журнал физической химии*. 2015. Т. 89, № 3. С. 385–387.

12. Wang B. L., Olivier H., Grönig H. Ignition of shock-heated H₂-air-steam mixtures. *Combust. Flame*. 2003. Vol. 133, Issues 1–2. Pp. 93–106; doi: 10.1016/S0010-2180(02)00552-7.
13. Beigzadeh Ashkan, Alabbad Mohammed, Liu Dapeng, Aljohani Khalid, Hakimov Khaiyom, Kashif Touqeer Anwar, Zanganeh Kourosh, Croiset Eric, Farooq Aamir. Reaction kinetics for high pressure hydrogen oxy-combustion in the presence of high levels of H₂O and CO₂. *Combust. Flame*. 2023. Vol. 247. Article ID 112498; doi: 10.1016/j.combustflame.2022.112498.
14. Крылов О. В. *Гетерогенный катализ: Учебник для вузов*. Москва: Академкнига, 2004.
15. Stupochenko E. V., Losev S. A., Osipov A. I. *Relaxation Processes in Shock Waves*. Heidelberg: Springer, 1967.
16. Konnov Alexander A. Yet another kinetic mechanism for hydrogen combustion. *Combust. Flame*. 2019. Vol. 203. Pp. 14–22; doi: 10.1016/j.combustflame.2019.01.032.
17. Kéromnès Alan, Metcalfe Wayne K., Heufer Karl A., Donohoe Nicola, Das Apurba K., Sung Chih-Jen, Herzler Jürgen, Naumann Clemens, Griebel Peter, Mathieu Olivier, Krejci Michael C., Petersen Eric L., Pitz William J., Curran Henry J. An experimental and detailed chemical kinetic modeling study of hydrogen and syngas mixture oxidation at elevated pressures. *Combust. Flame*. 2013. Vol. 160, Issue 6. Pp. 995–1011; doi: 10.1016/j.combustflame.2013.01.001.
18. Smith G. P., Tao Y., and Wang H. *Foundational Fuel Chemistry Model Version 1.0 (FFCM-1)*. 2016; <http://nanoenergy.stanford.edu/ffcm1>.
19. Козлов С. Н., Александров Е. Н., Кузнецов Н. М., Маркевич Е. А. Особенности реакций окисления водорода и метана в районе третьего предела воспламенения в кварцевых и металлических реакторах. *Химическая физика*. 2013. Т. 32, № 11. С. 75.
20. Александров Е. Н., Маркевич Е. А., Козлов С. Н., Частрухин Д. С., Кузнецов Н. М. Вырожденный взрыв гремучего газа на третьем пределе воспламенения, инициируемый продуктами гетерогенной реакции на малоактивном катализаторе (кварце). *Физика горения и взрыва*. 2013. Т. 49, № 1. С. 3.
21. Маркевич Е. А., Козлов С. Н., Александров Е. Н., Кузнецов Н. М. Сравнительный анализ механизмов гетерогенных стадий реакций окисления водорода и метана. *Химическая физика*. 2014. Т. 33, № 6. С. 47.
22. Кондратьев В. Н., Никитин Е. Е. *Кинетика и механизм газофазных реакций*. Москва: Наука, 1974.
23. Sinev M. Y. Modeling of oxidative transformations of light alkanes over heterogeneous catalysts. *Russ. J. Phys Chem. B*. 2007. Vol. 1. Pp. 412–433; doi: 10.1134/S1990793107040094.
24. Тереза А. М., Агафонов Г. Л., Андержанов Э. К., Бетев А. С., Медведев С. П., Хомик С. В., Черепанова Т. Т. Численное моделирование влияния примесей на самовоспламенение бедных смесей водорода с воздухом. *Химическая физика*. 2023. Т. 42, № 3. С. 70–78; <https://10.31857/S0207401X23030172>.