

На правах рукописи

Косарев Илья Николаевич

**Кинетика неравновесного воспламенения газовых
смесей под воздействием лазерного флэш-фотолиза
и наносекундного разряда**

01.04.08 — физика плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Долгопрудный - 2008

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Московский физико-технический институт (государственный университет)"

Научный руководитель:

д.ф.-м.н., проф., Стариковская Светлана Михайловна

Научный консультант:

д.ф.-м.н., доцент Стариковский Андрей Юрьевич

Официальные оппоненты:

д.ф.-м.н., Фролов Сергей Михайлович

к.ф.-м.н., Шаталов Олег Петрович

Ведущая организация: Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований

Защита состоится 23 октября 2008 г. в 14.00

на заседании диссертационного совета Д 212.156.03 при Московском физико-техническом институте по адресу: 141700, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского физико-технического института.

Автореферат разослан 22 сентября 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Арсенин А.В.

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы

В последние десятилетия наблюдается существенный интерес к исследованию воспламенения горючих смесей низкотемпературной плазмой, что, по-видимому, следует связывать как с развитием экспериментальной техники генерации коротких мощных импульсов напряжения, так и с развитием диагностической техники. Эффективность воспламенения при искусственном добавлении в смесь атомарного кислорода рассматривалась еще в монографии Н.Н.Семенова [1], а первые попытки экспериментальной реализации данной идеи следует относить к 30-м годам XX века [2]. Результаты экспериментов, проведенных в условиях горения в быстрых газовых потоках [3, 4], в газовых горелках лабораторного и полупромышленного масштаба [5, 6], в специально разработанных реакторах [7] и ударных трубах [8] демонстрируют принципиальную возможность воспламенения горючей смеси с помощью неравновесной плазмы, расширение области параметров горения смеси и уменьшение времени задержки воспламенения.

В настоящее время хорошо известны различные способы инициирования воспламенения и поддержания горения в газовой фазе. Среди них можно выделить следующие: прямое инжектирование плазмы дугового разряда постоянного тока [11]; лазерно-индуцированное воспламенение [12, 13]; искровое воспламенение [14]. Несмотря на то, что цепной механизм горения достаточно хорошо изучен, ещё недостаточно ясен вопрос о влиянии различных классов частиц на задержку воспламенения при искусственном инициировании горения. Например, широко обсуждается роль заряженных [9] и электронно-возбужденных частиц [10] в кинетическом механизме воспламенения. Кинетические модели воспламенения неравновесной плазмой, основанные на детальном описании газового разряда [15], кинетики разряда [16] и горения [16, 17], требуют получения количественных экспериментальных данных, позволяющих проводить тестирование каждого из предложенных механизмов.

К настоящему времени известен ряд работ в области применения высоковольтного наносекундного разряда для плазмохимических исследований. В их числе — изучение воздействия наносекундных разрядов на возбуждение внутренних степеней свободы газа [18], а также исследования, связанные с изучением кинетики медленного окисления углеводородов при комнатной температуре под действием высоковольтного наносекундного разряда при частоте повторения импульсов в несколько десятков герц.

В работах [19, 8, 20, 21] впервые начал изучаться высоковольтный наносекундный разряд как способ однородного воспламенения горючих газовых смесей при высоких (около 1100–2200 К) начальных поступательных температурах. Рассматривалось воспламенение метано-воздушных и водородо-воздушных смесей, разбавленных аргоном или гелием. На основе проведенных расчетов и экспериментов была показана высокая эффективность высоковольтного наносекундного разряда,

позволяющего существенно сократить времена индукции воспламенения. Было показано, что при увеличении плотности газа эффективность плазмохимического воздействия разряда заметно снижается. Была исследована пространственная однородность высоковольтного наносекундного разряда и её зависимость от давления воспламеняющейся горючей смеси.

Данная работа представляет собой экспериментальное и теоретическое исследование воспламенения горючих смесей под действием импульсного наносекундного разряда и импульсного лазерного излучения за фронтом отраженной волны в ударной трубе. Проводились эксперименты по воспламенению смесей гомологического ряда углеводородов от CH_4 до C_5H_{12} с кислородом под действием высоковольтного наносекундного разряда. Эксперименты по воспламенению смесей, содержащих N_2O , с помощью лазерного излучения были проведены с целью анализа роли участия возбужденных атомов кислорода в процессе воспламенения.

Цель работы

Целью настоящей работы является исследование механизма сокращения времён индукции воспламенения горючих смесей под воздействием плазмы высоковольтного наносекундного разряда. При этом были поставлены и решены следующие задачи:

- Провести эксперименты по измерению времён задержки воспламенения стехиометрических смесей $\text{C}_n\text{H}_{2n+2} : \text{O}_2 : \text{Ar}$ ($\text{Ar}—90\%$) для $n = 1 \div 5$ под действием высоковольтного наносекундного разряда в широком диапазоне температур над порогом воспламенения и сравнить результаты с временами задержки автовоспламенения, полученными при тех же начальных термодинамических условиях.
- Получить временные профили продольной составляющей напряжённости электрического поля и тока разряда в экспериментах по плазменно-стимулированному воспламенению.
- Провести моделирование процесса воспламенения с учётом воздействия на газ импульсного разряда. Определить количественно эффект воздействия плазмы на воспламенение горючих смесей.
- Сравнить времена задержки воспламенения, полученные экспериментально и численно. Определить основные причины ускорения воспламенения при использовании высоковольтного наносекундного разряда.
- Экспериментально сравнить эффективность воздействия излучения ArF -лазера и наносекундного высоковольтного разряда на ускорение воспламенения горючих смесей, содержащих N_2O .
- Построить кинетическую схему, позволяющую моделировать процессы химической кинетики в смесях, содержащих N_2O , O_2 и H_2 , слабо разбавленных

Ag. Провести кинетическое моделирование процесса воспламенения и сравнить результаты с экспериментальными. Выделить основные химические процессы, ответственные за ускорение воспламенения смеси.

Научная новизна

1. Впервые измерены времена задержки воспламенения стехиометрических смесей $C_nH_{2n+2} : O_2 : Ag$ ($Ag=90\%$) для $n = 1 \div 5$ при высоких температурах под действием импульсного высоковольтного наносекундного разряда. Проведено сравнение плазменно-стимулированного воспламенения с автовоспламенением при одинаковых начальных термодинамических условиях и контролируемом энерговыкладе от разряда в газ. Экспериментально определён количественный эффект воздействия неравновесной плазмы на воспламенение горючих смесей. Проведены измерения параметров наносекундного разряда, достаточные для численного моделирования экспериментов по плазменно-стимулированному воспламенению.
2. Впервые предложен способ моделирования, описывающий воспламенение смесей предельных углеводородов гомологического ряда с кислородом под действием импульсного высоковольтного наносекундного разряда. На основании результатов численных расчетов показано, что сокращение времён задержки воспламенения по сравнению с автовоспламенением при плазменно-стимулированном воспламенении в области температур над порогом воспламенения связан с образованием атомов и радикалов. Определяющими в эффекте ускорения воспламенения являются атомы кислорода, образовавшиеся при диссоциации электронным ударом на стадии разряда.
3. Впервые проведены эксперименты по определению и сравнению времён задержки автовоспламенения и воспламенения под действием импульса однородного лазерного ($\lambda=193$ нм) излучения в смесях, содержащих N_2O , O_2 и H_2 , слабо разбавленных Ag в одинаковых начальных термодинамических условиях. Экспериментально получен количественный эффект ускорения воспламенения под действием лазерного излучения.
4. Построена оригинальная кинетическая схема, позволяющая моделировать процессы химической кинетики в смесях, содержащих N_2O , O_2 и H_2 , слабо разбавленных Ag. Проведено кинетическое моделирование процесса автовоспламенения и воспламенения смеси под действием импульса нефокусированного лазерного излучения.
5. Впервые проведено экспериментальное сравнение эффектов ускорения воспламенения в смесях, содержащих N_2O , O_2 и H_2 , под действием импульса лазерного излучения и под действием импульсного наносекундного разряда с одинаковыми удельными энерговыкладами при одних и тех же начальных термодинамических условиях.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Результаты экспериментального исследования времён задержки воспламенения стехиометрических смесей $C_nH_{2n+2} : O_2 : Ar$ ($Ar=90\%$) для $n = 1 \div 5$ в диапазоне температур от 1000 К до 2200 К и давлений от 0,2 до 1 атм под действием импульсного наносекундного разряда отрицательной полярности длительностью 40 нс и амплитудой 120 кВ.
2. Результаты моделирования воспламенения стехиометрических смесей $C_nH_{2n+2} : O_2 : Ar$ ($Ar=90\%$) для $n = 1 \div 5$ в условиях проведённых экспериментов.
3. Кинетическая схема, применимая к моделированию слаборазбавленных инертным газом смесей, содержащих N_2O , O_2 и H_2 .
4. Результаты экспериментов и расчётов по автовоспламенению и воспламенению под действием импульса однородного лазерного ($\lambda=193$ нм) излучения смесей, содержащих N_2O , O_2 и H_2 .
5. Результаты экспериментального исследования времён задержки воспламенения в смесях, содержащих $N_2O/O_2/H_2$, в диапазоне температур от 900 К до 2000 К и давлений от 0,2 до 1,2 атм под действием однородного лазерного импульса излучения и под действием импульсного наносекундного разряда с одинаковыми удельными энерговкладами.

Практическая и научная ценность

Основная ценность работы заключается, в первую очередь, в установлении основной причины ускорения воспламенения горючих смесей при помощи высоковольтного наносекундного разряда. Полученные в работе результаты могут быть использованы широким кругом специалистов, занимающихся изучением воздействия плазмы на реагирующие системы. Методы, развитые в диссертации, могут быть полезны:

1. для дальнейшего развития экспериментов по плазменно-стимулированному воспламенению;
2. для тестирования и построения моделей плазменно-стимулированного воспламенения;
3. для дальнейшего развития экспериментов и построения моделей воспламенения горючих газовых смесей с помощью фотолиза одного из компонент;
4. для разработки диагностики активных атомов и промежуточных компонент в период индукции воспламенения.

Результаты данной работы могут способствовать развитию ряда приложений задачи стабилизации горения и воспламенения газовых смесей, а также при оценке эффективности МГД-генераторов в скоростных потоках частично ионизованных газов.

Апробация работы

В основу диссертации положены работы, опубликованные в 4 статьях и 30 докладах (тезисах докладов) научных конференций.

Основные результаты работы, докладывались диссертантом на следующих конференциях: The 26-th International Symposium on Shock Waves (Goettingen 2007), The 31-st International Symposium on Combustion (Heidelberg 2006), The 1-st European Conferences for Aerospace Sciences (Москва 2005), The 5-th International Conference on MHD Energy Conversion (Москва 2005), 6, 7-th International Workshops on Magnetoplasma Aerodynamics (Москва 2005, 2007), The 4-th International Symposium on Theoretical and Applied Plasma Chemistry (Иваново 2005), конференция по физике экстремальных состояний вещества (Эльбрус, 2006), XXXI Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (Звенигород 2005), XLVIII, XLIX, L Научные конференции МФТИ (Долгопрудный 2005, 2006, 2007).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из 8 глав. Работа изложена на 150 страницах текста, включает 67 рисунков, 12 таблиц. Список литературы насчитывает 130 наименований.

Содержание диссертации

Первая глава является введением в работу, где обоснована актуальность диссертации, сформулированы основные ее цели и задачи, охарактеризованы научная новизна и практическая ценность полученных результатов, кратко изложено содержание по главам.

Вторая глава содержит обзор литературы по экспериментальным и теоретическим методам исследования горения и поджига горючих газовых смесей неравновесными способами.

Третья глава посвящена описанию экспериментального оборудования и методам диагностики, используемым в работе.

Описывается экспериментальная установка и методика измерений термодинамических параметров газа в ударной трубе. Ударная труба широко используется для контролируемого получения высоких температур при исследовании физико-химических процессов в газе.

В настоящей работе ударная труба использовалась для нагрева газа. За фронтом отраженной ударной волны реализовывались необходимые для экспериментов термодинамические условия. Общий вид экспериментальной установки представлен на Рис. 1. Одномерная теория ударной трубы позволяет рассчитать плотность, температуру и давление газа за отраженной ударной волной по известным

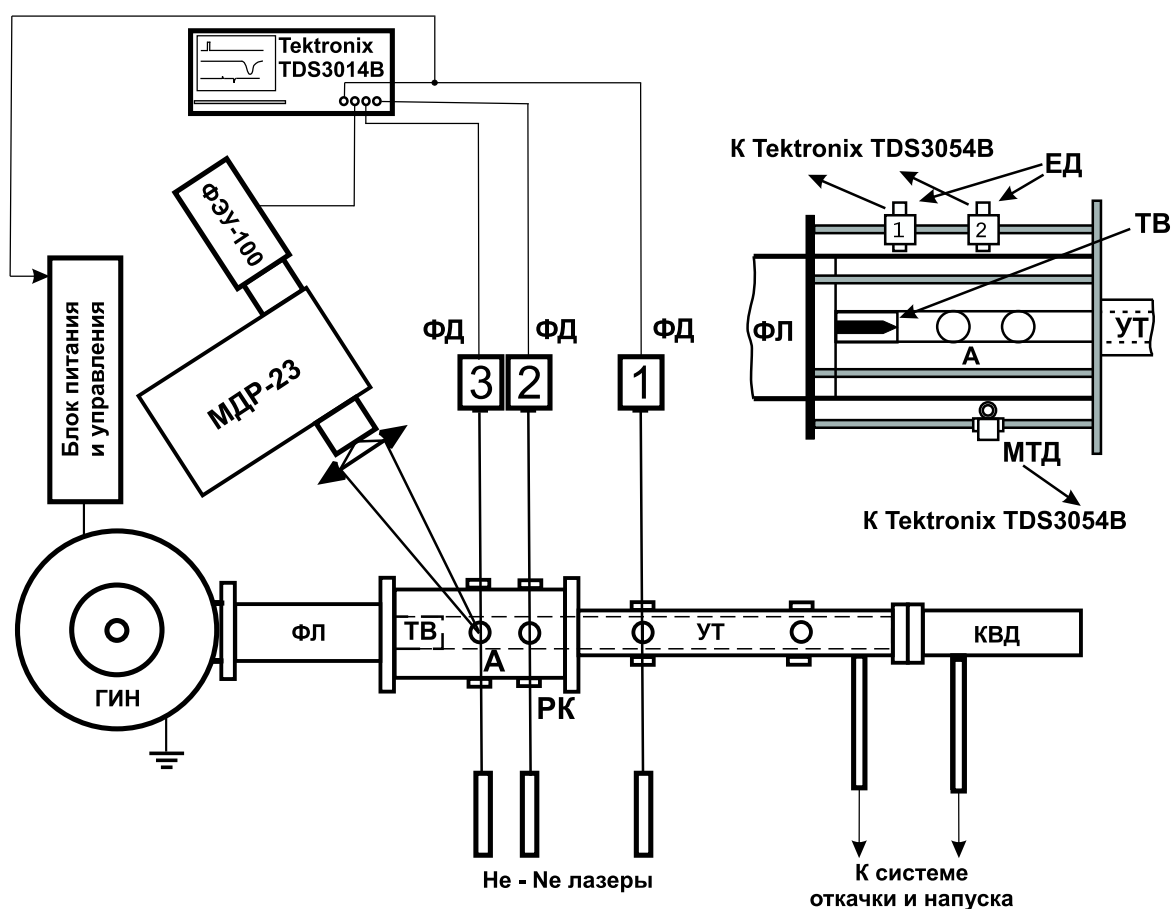


Рис. 1: Схема экспериментальной установки: УТ — ударная труба; РК — разрядная секция УТ; А — измерительное сечение УТ; ТВ — торцевая вставка с высоковольтным электродом; КВД — камера высокого давления; ГИН — генератор импульсов напряжения; ФД — фотодиоды; МДР-23 — монохроматор; ФЭУ-100 — фотоэлектронный умножитель; ЕД — ёмкостный датчик; МТД — магнитный токовый датчик. На вставке изображена увеличенная часть УТ с разрядной камерой.

начальным значениям температуры, давления газа в камере низкого давления (КНД) и скорости падающей ударной волны.

В экспериментах по плазменно-стимулированному воспламенению наносекундный разряд создавался непосредственно в нагретом за отраженной ударной волной газе. Основой всех экспериментов по воспламенению являлось определение начала горения смеси. В каждом эксперименте детектировалось излучение СН ($\lambda = 431$ мм, $A^2\Delta \rightarrow X^2\Pi$) либо ОН ($\lambda = 306$ мм, $A^2\Sigma \rightarrow X^2\Pi$) радикалов. Изображение ближайшего к торцу ударной трубы кварцевого окна фокусировалось на входной щели монохроматора с помощью конденсора. В монохроматор МДР-23 была установлена дифракционная решетка 1200 штрихов/мм. Из монохроматора излучение попадало на фотокатод фотоэлектронного умножителя ФЭУ-100. Далее через усилитель и эмиттерный

повторитель сигнал с ФЭУ подавался на осциллограф Tektronix TDS 3014B. Пропускающая способность диагностического окна камеры предварительно проверялась в необходимом диапазоне длин волн и всегда превышала 90%. В части экспериментов, для более точного определения прихода волны горения в диагностическое сечение, на окно разрядной камеры устанавливалась вертикальная щель 3×20 мм, а сама камера, изготовленная из оргстекла, оптически изолировалась от щели монохроматора. Применение щели на окне разрядной камеры и шторы оптического изолирования позволило сократить погрешность в определении времени воспламенения до 5 мкс.

На Рис. 2 представлены осциллограммы, полученные системой микросекундной диагностики воспламенения. Это сигналы с шпирен-датчиков и сигнал, соответствующий интенсивности излучения радикала СН на длине волны 431 нм. В режиме автовоспламенения изменение температуры газа со временем за фронтом отражённой ударной волны, $T_5(t)$, дополнительно контролировалось по ИК-излучению небольшой (1 %) добавки CO_2 . Интенсивность излучения на длине волны 4.2 мкм, прошедшего через интерференционный фильтр, сравнивалось с излучением специально подготовленной калибровочной смеси $\text{Ar}:\text{CO}_2=99:1$. Было показано, что в условиях данных экспериментов ошибка, связанная с несовпадением температуры T_5 с рассчитанной по одномерной теории, не может превышать ± 30 К. Осциллограммы сигналов с шпирен-датчиков на Рис. 2 имеют пики, относящиеся к приходу падающей ударной волны (положительные выбросы на кривых 1 и 2), и пик, относящийся к прохождению отражённой волны (отрицательный выброс на кривой 2). Кривая 2 — сигнал с шпирен-датчика, расположенного в измерительном сечении. Время задержки автовоспламенения τ определялось как время между приходом отражённой ударной волны в измерительное сечение и ростом сигнала, соответствующего интенсивности излучения. При воспламенении смеси с помощью разряда высоковольтный импульс был синхронизован с шпирен-сигналом отражённой волны и время задержки воспламенения определялось как время между сигналом от разряда и началом сигнала от излучения. Время иницирования разряда можно легко определить по короткой мощной наводке на всех осциллограммах с измерительной аппаратуры микросекундного диапазона (например, при $t = 0$ мкс на Рис. 2б). Как правило, синхронизация разряда с приходом ударной волны настраивалась так, что время между приходом волны в измерительное сечение и иницированием разряда составляло $\Delta t=20$ мкс. Это делалось для того, чтобы отраженная ударная волна полностью прошла мимо окна, стоящего в диагностическом сечении, и часть разрядного промежутка, наблюдаемая нами оптически, была однородна по термодинамическим параметрам в момент иницирования разряда. Измеряемые в эксперименте времена индукции автовоспламенения, как правило, существенно превышают выбранное значение $\Delta t=20$ мкс. Это означает, что изменение состава смеси в течение времени Δt не является существенным. Таким образом, этот промежуток времени не учитывался при измерении задержки воспламенения.

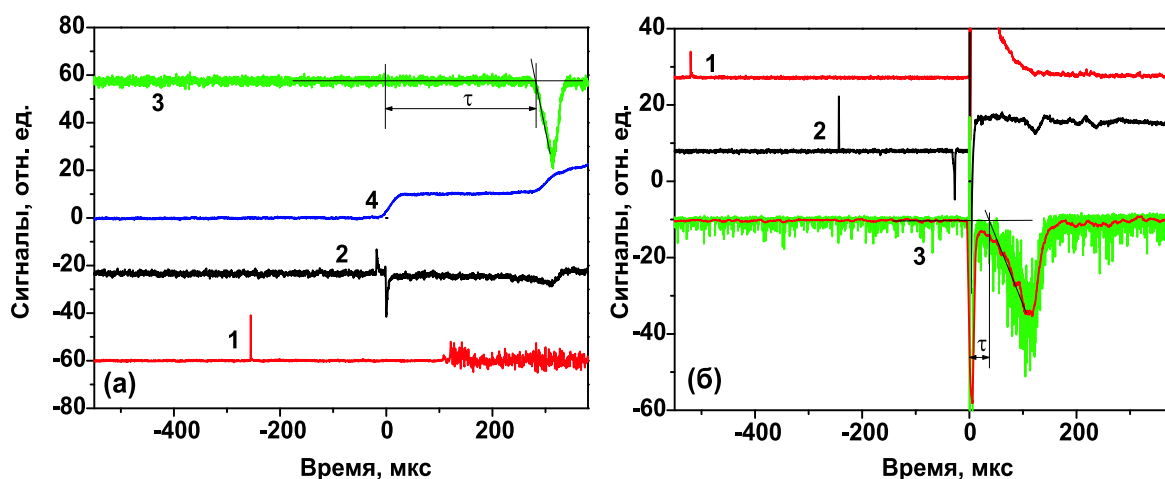


Рис. 2: Типичное поведение сигналов с (1)–(2) пирен–датчиков, (3) фотоэлектронного умножителя и (4) ИК–датчика в микросекундном масштабе при (а) автовоспламенении ($T_5 = 1770$ К, $P_5 = 0.5$ атм) и (б) воспламенении с разрядом ($T_5 = 1400$ К, $P_5 = 0.5$ атм). Расстояние между пирен–датчиками 226 мм. Амплитуда высоковольтного импульса — $U = -115$ кВ.

Четвертая глава посвящена описанию основных методик, использованных для моделирования кинетических процессов в экспериментах по автовоспламенению горючих газовых смесей и для моделирования воспламенения смесей под воздействием импульсного высоковольтного наносекундного разряда и лазерного фотолиза.

В рассматриваемых условиях разряд развивается в наносекундном, а воспламенение в микросекундном диапазоне времён. Поэтому временные профили концентраций частиц при моделировании плазменно–стимулированного горения рассчитывались отдельно для разрядной фазы и для фазы воспламенения. Предполагалось, что влияние неравновесной плазмы разряда сводится к образованию активных частиц, влияющих на время задержки воспламенения.

Описываются основные уравнения и принципы, используемые при вычислении функции распределения электронов по энергиям и частот столкновительных процессов электронов с нейтралами. Описываются прикладные пакеты для решения уравнения Больцмана в двучленном приближении (BOLSIG+ [25]) и для решения систем уравнений химической кинетики (CHEMKIN).

Пятая глава посвящена описанию результатов экспериментов и численного моделирования воспламенения метан–кислородной смеси. Сравниваются времена задержки плазменно–стимулированного воспламенения и автовоспламенения. На основании численного моделирования делаются выводы о поведении концентраций компонент, скоростей основных реакций и температуры в период индукции и при воспламенении.

Экспериментально и численно исследовалась кинетика воспламенения

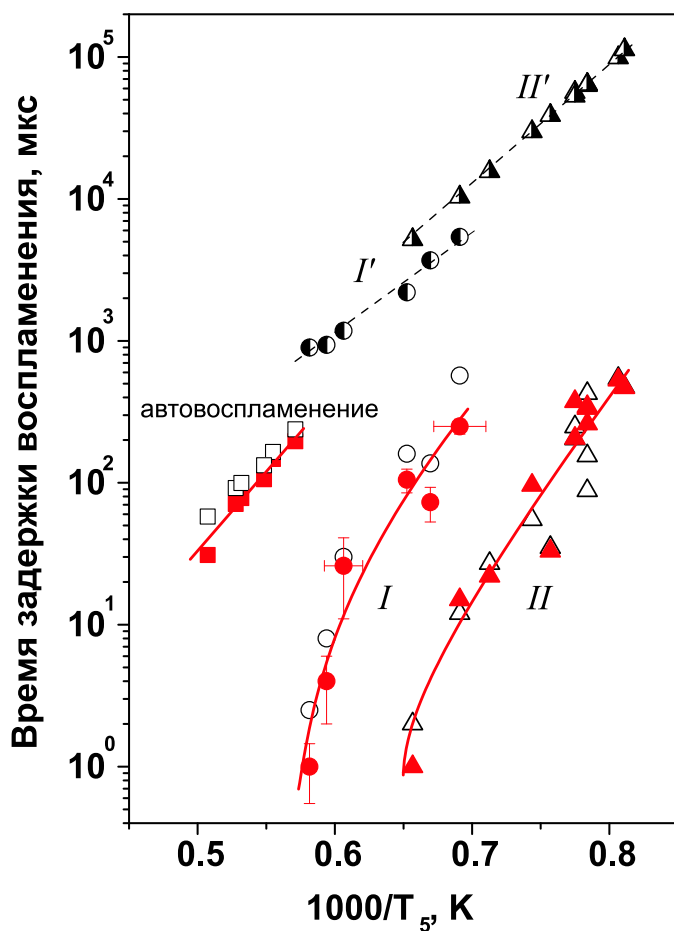


Рис. 3: Времена задержки воспламенения в смеси $\text{CH}_4:\text{O}_2:\text{Ar}=3.3:6.7:90$ как функция от начальной температуры для автовоспламенения и ($I-II$) воспламенения с помощью разряда. Закрашенные символы — результаты измерений, незакрашенные символы — результаты расчётов. Сплошные линии — аппроксимация экспериментальных данных. Штриховые линии I' и II' и полу-закрашенные символы — результаты расчётов и аппроксимация при моделировании автовоспламенения для смеси в тех же условиях, что и серии I и II , соответственно.

стехиометрической смеси $\text{CH}_4:\text{O}_2$ (10 %), разбавленной Ar на 90 %, под действием высоковольтного наносекундного разряда. В термодинамических условиях, полученных за фронтом отраженной ударной волны, производились измерения времен задержки воспламенения при дополнительном воздействии на газ разрядом и в его отсутствие. Было показано, что при плотности энергии разряда $10-30 \text{ мДж/см}^3$ время задержки воспламенения уменьшается на несколько порядков величины по сравнению с автовоспламенением. Был разработан алгоритм и сопутствующий ему кинетический механизм, позволяющий определить наработку активных частиц в разряде и послесвечении. Как входные параметры, в расчёте использовались экспериментально полученные временные профили тока и поля в разряде. Полученные концентрации химически активных частиц служили входными параметрами для кинетического расчёта химических процессов, проходящих при воспламенении горючей смеси. Расчётные времена индукции хорошо совпадают с полученными экспериментально (см. Рис. 3). Анализ результатов расчётов показал, что влияние неравновесной плазмы на длительность периода индукции воспламенения преимущественно связано с более быстрым развитием цепных реакций благодаря присутствию атомов O и H, полученных в результате диссоциации электронным ударом во время разряда.

На Рис. 4а и Рис. 4б для случаев автовоспламенения и воспламенения при помощи разряда представлены зависимости от времени относительных концентраций начальных компонент, продуктов горения и основных атомов и радикалов, а также промежуточных стабильных молекул, концентрация которых достаточно высока. В период индукции автовоспламенения в составе атомов и радикалов доминирует CH_3 . Относительные концентрации H_2O , H_2 и CO увеличиваются постепенно, тогда как концентрации O , H и OH остаются на порядок меньше во время всего периода индукции воспламенения и достигают значительных величин только непосредственно во время воспламенения. В случае плазменно-стимулированного воспламенения избыток O и H в начале периода индукции воспламенения приводит к существенному изменению состава горючей смеси уже после первой микросекунды, когда концентрации H_2O , H_2 и CO становятся сравнимы с начальными концентрациями образовавшихся в разряде атомов и радикалов. Появляются также некоторые промежуточные компоненты, важные на фазе развития воспламенения. Например, концентрация CH_2O достигает 10^{-3} за 1 мкс, и затем продолжает медленно расти до момента воспламенения, в то время как мольная доля C_2H_6 за микросекунду вырастает до 3×10^{-5} и достигает 7×10^{-4} на 40-ой микросекунде. Температура газа остаётся практически постоянной во время всего периода индукции автовоспламенения ($\Delta T < 5 \text{ K}$), а при плазменно-стимулированном поджиге она заметно растёт ($\Delta T < 100 \text{ K}$) в период индукции.

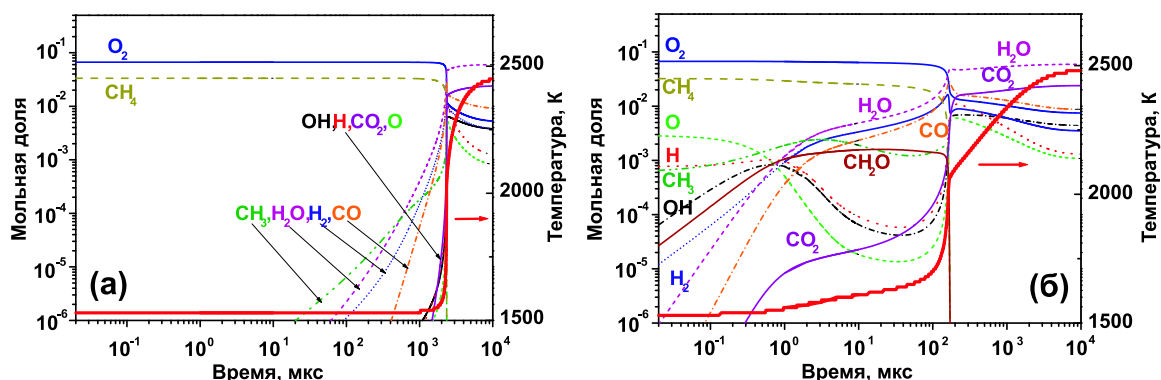


Рис. 4: Временные профили мольных долей основных компонент для автовоспламенения (а) и воспламенения при помощи разряда (б) при $T_5 = 1530 \text{ K}$ и $P_5 = 1.1 \text{ атм}$ в смеси $\text{CH}_4:\text{O}_2:\text{Ar}=1:2:27$. График температуры газа представлен жирной линией.

Был проведён анализ чувствительности времён индукции к изменению констант скоростей химических реакций и к количественным параметрам, таким как изменение напряжённости электрического поля, изменению концентраций и состава активных частиц, образовавшихся в разряде. Выделены химические процессы и количественные параметры, оказывающие наибольшее влияние на ускорение или

замедление воспламенения.

Результаты численного моделирования плазменно–стимулированного воспламенения показали, что при высоких начальных температурах газа влияние разряда сводится к наработке атомов и радикалов, которые являются инициаторами цепных реакций. Также следует отметить, что при низких начальных температурах на воспламенение может также оказывать эффект выделения тепла в экзотермических реакциях и как следствие — существенный нагрев смеси в период индукции воспламенения. Этот дополнительный нагрев приводит к ускорению реакций и уменьшению периода задержки воспламенения.

Шестая глава посвящена описанию результатов экспериментов и численного моделирования воспламенения смесей предельных углеводородов гомологического ряда (этан, пропан, бутан и пентан) в смеси с кислородом. Сравниваются времена задержки плазменно–стимулированного воспламенения и автовоспламенения. На основании численного моделирования делаются выводы о поведении концентраций компонент, скоростей основных реакций и температуры в период индукции и при воспламенении.

Экспериментально и численно исследовалась кинетика воспламенения смеси $C_nH_{2n+2}:O_2:Ar$ от $n = 2$ до 5 под воздействием высоковольтного наносекундного разряда. Времена задержки воспламенения измерялись в условиях за фронтом отражённой ударной волны в экспериментах с разрядом и без разряда (автовоспламенение). Было показано, что иницирование разряда с удельным энерговыделением 10–30 мДж/см³ приводит к уменьшению времени индукции воспламенения на порядки. Были смоделированы процессы разряда и следующее за ним развитие цепных химических реакций, ведущих к воспламенению. Константы скоростей реакций наработки активных частиц в разряде были рассчитаны на основе численного решения уравнения Больцмана. Образование атомов, радикалов, возбуждённых и заряженных частиц было численно промоделировано на основе экспериментально полученных временных профилей электрического поля и тока в разрядном промежутке. Рассчитанные концентрации активных частиц использовались как входные параметры для расчёта плазменно–стимулированного воспламенения. Был проведён анализ чувствительности численно полученных результатов к изменению сечений процессов взаимодействия электронов с частицами, к изменению констант скоростей химических реакций и к изменению состава атомов и радикалов образовавшихся в разрядной фазе. Анализ результатов вычислений показал, что воздействие неравновесной плазмы на время задержки воспламенения в основном связано с более быстрым иницированием цепных реакций, из-за высокой концентрации атомов и радикалов, получившихся на фазе разряда в процессах диссоциации молекул электронным ударом. Было изучено влияние различных углеводородных радикалов, образование которых возможно на фазе разряда, на времена задержки плазменно–стимулированного воспламенения.)

Мало известно про константы скорости и продукты реакций рекомбинации электронов с ионами углеводородов. Предполагалось, что константы реакций

рекомбинации ионов углеводородов равны константе скорости реакции рекомбинации иона $C_2H_5^+$, взятой из [22]. Продукты электрон–ионной рекомбинации брались по наиболее вероятным каналам протекания реакций, взятым из [23]. Дополнительные расчёты с использованием более детальной схемы показали, что основным положительным ионом в послесвечении разряда может быть HCO^+ вместо O_2^+ . Тем не менее, рассчитанные концентрации активных нейтральных частиц слабо изменяются при изменении состава ионов в послесвечении разряда, и поэтому, большинство расчётов велось по упрощённой схеме, представленной в диссертации.

Константы скоростей реакций диссоциации электронным ударом, возбуждения электронным ударом и ионизации электронным ударом рассчитывались как функции от E/n_5 . Для решения уравнения Больцмана в классическом двучленном приближении [24] и определения неравновесного распределения электронов по энергиям использовался стандартный программный пакет BOLSIG+ [25]. При решении уравнения Больцмана входными параметрами были временные профили приведённой к концентрации газа напряжённости электрического поля E/n_5 и начальный состав газа. Распределение электронов слабо зависело от температуры газа. Рассматривались только столкновения электронов с атомами и молекулами основных компонент в газовой смеси. В интеграле столкновений в уравнении Больцмана рассматривались столкновения электронов только с O_2 , Ar и молекулами углеводородов. Влияние электрон–электронных столкновений и столкновений электронов с вновь образовавшимися в разряде частицами не учитывалось из-за низкой относительной концентрации этих частиц.

Для столкновений электронов с Ar [26], O_2 [27] и C_2H_6 [28] использовались доступные в литературе самосогласованные наборы сечений, которые дают хорошее совпадение между вычислениями и измерениями для транспортных коэффициентов и частот столкновений в чистых газах. Не было найдено надёжных самосогласованных наборов сечений процессов при столкновении электронов с C_3H_8 , C_4H_{10} и C_5H_{12} . Сечения диссоциации и ионизации электронным ударом молекул C_2H_6 и C_3H_8 были аналитически оценены в [23]. К тому же, эти данные были рекомендованы только для высоких (> 20 эВ) энергий электронов, тогда как в условиях наносекундного разряда основными являются электроны с энергиями, близкими к пороговым значениям для рассматриваемых процессов. Поэтому данные из [23] не были использованы, а предполагалось, что сечения процессов при столкновениях электронов с углеводородами совпадают с сечениями, используемыми в расчетах для C_2H_6 .

Продукты диссоциации электронным ударом молекул типа C_nH_{2n+2} не известны для $n > 1$. Энергия связей C–C ниже чем энергия связей C–H. Тем не менее, различие в энергиях связей C–C и C–H много меньше, чем средняя энергия электронов в высоковольтном наносекундном разряде и продукты реакции диссоциации электронным ударом могут быть различны. Для оценки образовавшихся в разряде активных частиц, было предположено, что продуктами диссоциации C_nH_{2n+2} электронным ударом будут C_2H_{2n+1} и атомы H. Согласно [23], это один из наиболее вероятных каналов процесса диссоциации электронным ударом для C_2H_6 и C_3H_8 .

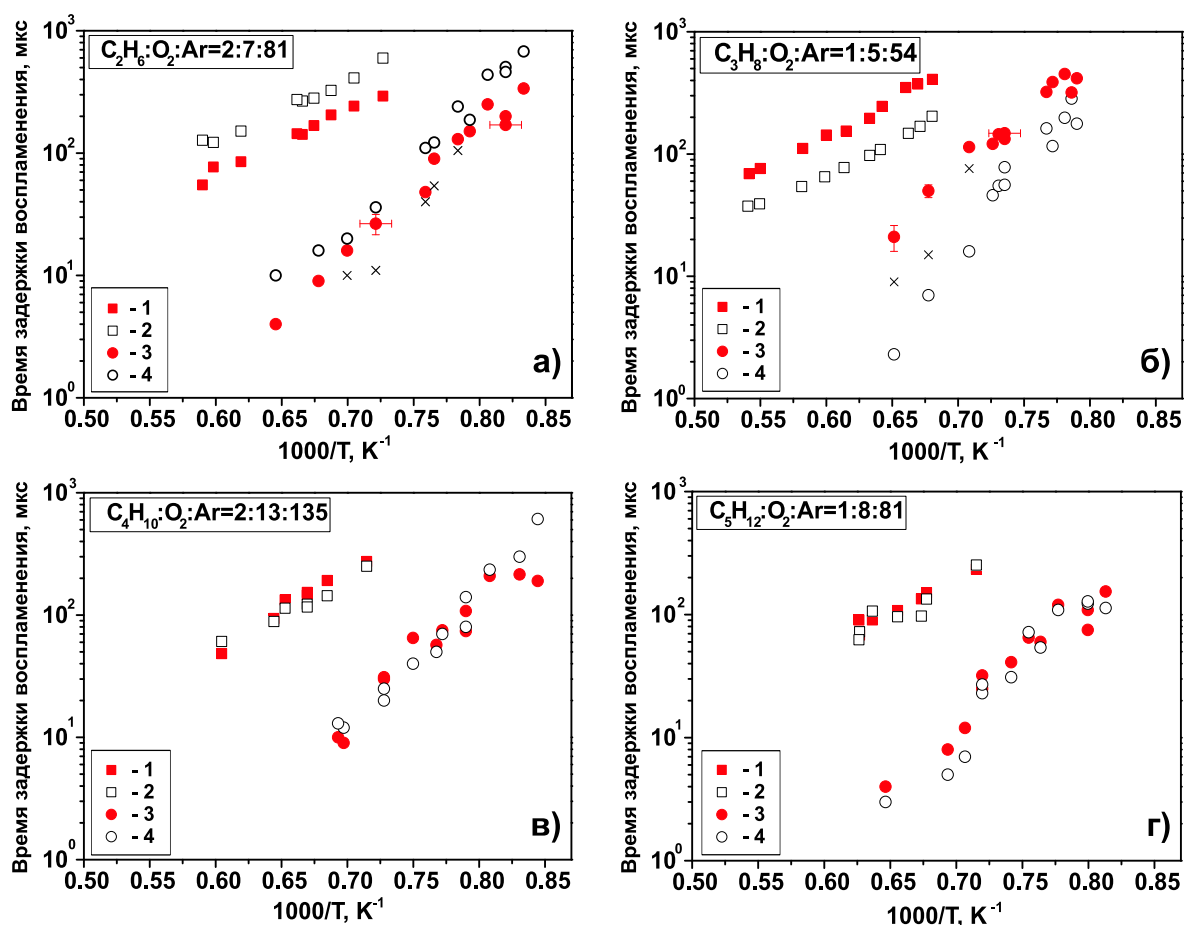


Рис. 5: Зависимости времени задержки воспламенения от температуры полученные экспериментально (1,3) и численно (2,4) для автовоспламенения (1,2) и плазменно-стимулированного воспламенения (3,4) в смесях кислорода с а) – этаном, б) – пропаном, в) – бутаном, г) – пентаном.

Показано, что наибольший эффект от разряда наблюдается при значениях напряжённости электрического поля в области 40–100 Тд. В составе активных частиц доминируют атомы кислорода и в некоторой степени существенное влияние оказывают продукты тушения O_2^* (4.5 эВ) в столкновениях с молекулами углеводорода.

На Рис. 5 представлены времена задержки автовоспламенения, измеренные в настоящей работе в стехиометрических смесях углеводородов гомологического ряда от C_2H_6 до C_5H_{12} с кислородом, разбавленных аргоном на 90 % как функции от начальной температуры газа для автовоспламенения и плазменно-стимулированного воспламенения. Воздействие разряда приводит к значительному сокращению времён задержки воспламенения и к воспламенению смесей при существенно более низких температурах и плотностях газа.

Процесс воспламенения C_2H_6 – C_5H_{12} -содержащих смесей был смоделирован с использованием кинетического механизма предложенного в [29] и проверен на

экспериментах по автовоспламенению в CH_4 – C_7H_{16} –содержащих смесях. Этот механизм является комбинацией механизма РАМЕС [30] и механизма Вестбрука (Westbrook's mechanism) предложенного для воспламенения углеводородов гомологического ряда от C_2H_8 до C_7H_{16} [31]. Механизмы были объединены в одну схему и те реакции механизма Вестбрука, которые дублировали соответствующие в механизме РАМЕС, удалялись из общей схемы. Такой же механизм использовался при слиянии данных по зависимостям энтальпии веществ от температуры. В результате кинетическая схема использованная при расчётах имела 549 компонент и 2518 реакций.

Возможно прямое сравнение автовоспламенения и плазменно–стимулированного воспламенения из-за перекрывающегося диапазона начальных термодинамических параметров: начальная температура газа T_5 была в диапазоне 1370 – 1850 К в экспериментах по автовоспламенению и 1180 – 1560 К в экспериментах по плазменно–стимулированному воспламенению. Начальная концентрация газа n_5 была в диапазоне $(0.6 - 2.6) \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в экспериментах по автовоспламенению и $(1.5 - 4.7) \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в экспериментах по плазменно–стимулированному воспламенению. При этом время задержки воспламенения сокращалось с сотен до единиц микросекунд.

Из данных представленных на Рис. 5а и Рис. 5б видно, что не было получено идеального соответствия между измеренными и рассчитанными временами задержки автовоспламенения в C_2H_6 – и C_3H_8 –содержащих смесях. При моделировании плазменно–стимулированного поджига в этих же смесях прослеживается та же тенденция к несовпадению, причём в C_2H_6 –содержащих смесях расчёты по плазменно–стимулированному поджигу, как и расчёты автовоспламенения, дают несколько большие значения задержек автовоспламенения по сравнению с экспериментальными. В C_3H_8 –содержащих смесях расчёты по плазменно–стимулированному поджигу, как и расчёты автовоспламенения, дают несколько меньшие значения задержек автовоспламенения по сравнению с экспериментальными.

Наибольшее влияние на погрешность при моделировании наносекундного разряда оказывает неточность определения напряжённости электрического поля в эксперименте. По оценкам, ошибка в концентрации активных частиц, вызванная неточностью определения напряжённости электрического поля, не превосходит 30 – 50 %, что может привести к пропорциональной ошибке при вычислении времени задержки воспламенения.

Исследовано развитие разряда и распределение энергии, выделившейся в разряде, по уровням возбуждения. Было показано, что в условиях экспериментов параметры разряда зависят от концентрации и не зависят от температуры газа. На основе экспериментально полученных данных о токе и напряжении в разрядном промежутке было проведено моделирование кинетических процессов в разряде с участием активных частиц. Было показано, что основными активными частицами в конце газоразрядной фазы (1 мкс после инициирования) являются атомы О, Н и радикалы $\text{C}_n\text{H}_{2n+1}$ соотносящиеся по концентрации как, соответственно, 1:0.4:0.3.

Численно было исследовано влияние типа и состава радикалов на время задержки воспламенения и показано, что влияние атомов кислорода наиболее значительно.

По аналогии с исследованием CH_4 -содержащей смеси [?], удалось теоретически описать экспериментальные данные в предположении того, что действие разряда сводится к быстрому появлению атомов и радикалов в горючей смеси. Это приводит к сокращению времени задержки воспламенения на порядок величины и согласуется с результатами экспериментов.

Дополнительные расчеты показали, что экспериментально полученное сокращение времён задержки воспламенения при воздействии разряда на горючую смесь может быть описано только как следствие влияния активных частиц произведённых на фазе разряда, а роль нагрева газа на фазе разряда значительно меньше. Было доказано, что сокращение времён задержки воспламенения горючих смесей под действием разряда связано с нетермическими процессами в плазме.

Анализ результатов численных расчётов показал, что при начальных температурах газа, близких к порогу воспламенения, для электрических полей, в которых большая часть энергии электронов расходуется на возбуждение и ионизацию нейтралов, диссоциация и возбуждение молекул электронным ударом на фазе разряда являются основными механизмами приводящим к сильному влиянию наносекундного разряда на воспламенение стехиометрических углеводород-кислородных смесей. Диссоциация электронным ударом приводит к образованию существенного количества атомов O и H на начальном этапе периода индукции воспламенения. В результате скорость цепных реакций на начальном этапе периода индукции воспламенения становится сравнимой со скоростью тех же реакций непосредственно в момент воспламенения.

Седьмая глава посвящена описанию результатов экспериментов по воспламенению смеси $\text{N}_2\text{O}:\text{H}_2:\text{O}_2:\text{Ar}=1:3:0,3:5$. Сравниваются времена задержки плазменно-стимулированного воспламенения, воспламенения с помощью лазерного фотолиза N_2O и автовоспламенения. Предложен кинетический механизм для моделирования слабо разбавленных инертным газом смесей, содержащих N_2O , H_2 и O_2 .

Кинетика химического превращения в смесях $\text{N}_2\text{O} : \text{H}_2 : \text{O}_2 : \text{Ar}$ изучена в температурном интервале 1000–2700 К и диапазоне давлений от 0.1 до 10 атм. С помощью эксперимента на ударной трубе получены данные по временам индукции воспламенения в слабо разбавленных инертным газом смесях (от 50 до 90% Ar). На основе полученных данных и кинетических экспериментов в смесях, содержащих до 97% Ar, предложен механизм, описывающий кинетику в данной системе. Уточнены значения ряда констант скоростей химических реакций с участием N_2O , NO и OH.

В данной главе на основании экспериментов в ударных трубах по автовоспламенению и мономолекулярному распаду смесей [32, 33, 34, 35], содержащих N_2O , водород и кислород, и соответствующего численного расчета предложен механизм, описывающий кинетику как сильно разбавленных $\text{N}_2\text{O}-\text{H}_2-\text{O}_2$ смесей, так и смесей с относительно слабым разбавлением инертным газом при

высоких ($T > 1000$ K) температурах и средних (до нескольких атм) давлениях.

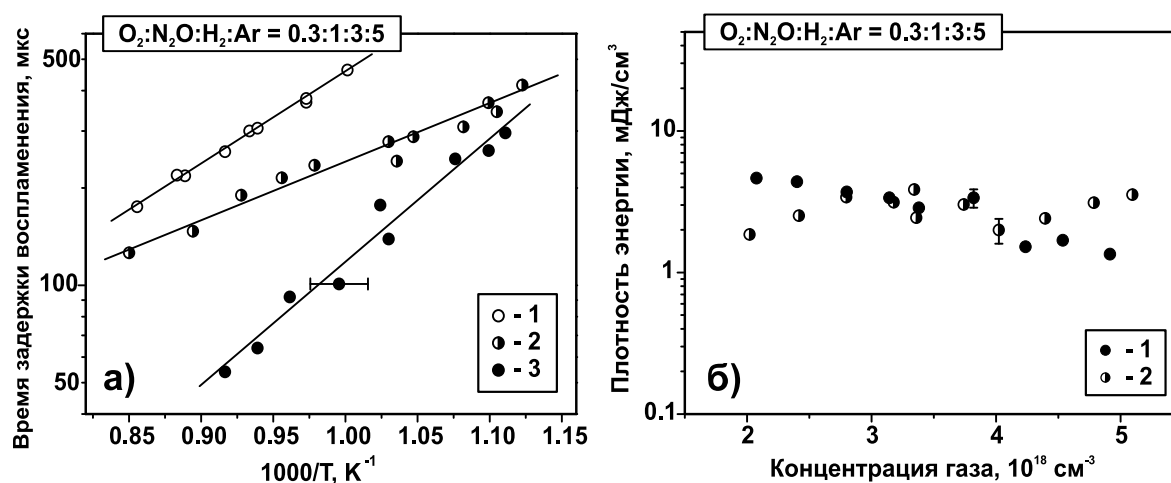


Рис. 6: а) Времена задержки воспламенения смеси $N_2O:H_2:O_2:Ar=1:3:0,3:5$ в зависимости от температуры при автовоспламенении – 1, воспламенении с помощью лазерного фотолиза – 2, плазменно-стимулированном воспламенении – 3. б) Плотность энергии вложенной в газ в экспериментах по воспламенению с помощью фотолиза – 1 и разряда – 2 в зависимости от концентрации газа

Эксперименты по плазменно-стимулированному воспламенению, воспламенению с помощью лазерного фотолиза N_2O и автовоспламенению проводились в смеси $O_2 : H_2 : N_2O : Ar = 3 : 30 : 10 : 50$ в диапазоне начальных температур от 850 до 1200 K и давлений от 0.3 до 0.7 атм. Полученные при этом времена индукции представлены на Рис. 6а. Целью экспериментов было сравнение влияния фотолиза и высоковольтного разряда на времена задержки воспламенения газа, находящегося в одних и тех же термодинамических условиях. Оба способа воздействия на смесь имели одинаковую по порядку величины продолжительность и плотность энерговклада (см. Рис. 6б). Оба метода обеспечивали пространственную однородность воздействия. Эти свойства позволяли сравнивать влияние особенностей, присущих непосредственно разряду или фотолизу.

В результате и в случае воздействия фотолиза, и в случае применения наносекундного разряда наблюдается существенное уменьшение времен индукции и сдвиг порога воспламенения в сторону меньших температур. Времена задержки воспламенения сокращаются до 2 раз при использовании лазерного фотолиза, и до 3х раз под действием наносекундного разряда.

Воздействие лазерного излучения имеет селективный характер и энергия излучения в основном идет на разрыв химических связей (фотолиз N_2O) и возбуждение электронных степеней свободы атомов O, в то время как энергия высоковольтного наносекундного разряда расходуется на значительно большее число элементарных процессов.

Экспериментально продемонстрировано влияние пространственно однородного образования активных частиц одного сорта на время задержки воспламенения в

смеси, содержащей O_2 , H_2 и N_2O .

Показано и проанализировано влияние добавки кислорода на кинетику воспламенения. На основе обработки экспериментальных данных получена оценка константы скорости реакции $N_2O + H_2 \rightarrow N_2 + H_2O$ в диапазоне $P=0.1-10$ атм и $T=1000-2700$ К. Проведен сравнительный анализ воздействия на горючую смесь неравновесной плазмы наносекундного разряда и однородного лазерного излучения. Показано, что при сравнимых значениях энергоклада сдвиги времени задержки воспламенения близки.

Предложена кинетическая схема, описывающая процесс воспламенения смесей содержащих O_2 , H_2 и N_2O в данном диапазоне давлений и температур. Описана кинетика воспламенения под воздействием лазерного флэш-фотолиза.

Восьмая глава является заключением, в котором формулируются основные результаты и выводы диссертации.

Основные результаты и выводы диссертации:

1. В работе развит метод количественного анализа кинетических процессов при воспламенении горючих газовых смесей с помощью неравновесной плазмы. Суть метода заключается в сопоставлении характеристик автовоспламенения горючей смеси и воспламенения с помощью наносекундного импульсного разряда при одних и тех же начальных условиях (давление, температура, состав смеси) и контролируемых параметрах разряда (энергоклад, величина и временное поведение электрического поля). Различие характерных времен развития разряда (десятки наносекунд) и процессов воспламенения (десятки-сотни микросекунд) позволяет разделить рассмотрение параметров плазмы и воспламенения как в эксперименте, так и при численном моделировании.
2. Проведено систематическое экспериментальное и численное исследование поджига с помощью наносекундного разряда стехиометрических углеводород-кислородных смесей, разбавленных аргоном, для углеводородов гомологического ряда от метана до пентана. Показано, что при плазменно-стимулированном поджиге $CH_4:O_2:Ar$ смеси времена задержки воспламенения сокращаются на 3 – 4 порядка по сравнению с автовоспламенением, в случае поджига смесей типа $C_nH_{2n+2}:O_2:Ar$, $n = 2 - 5$ — на 1 – 2 порядка по сравнению с автовоспламенением. Удельный энергоклад наносекундного разряда в смесь составляет 10 – 30 мДж/см³. Проведенный анализ максимально возможного разогрева газа показал, что процесс воспламенения наносекундным разрядом в условиях данной работы носит существенно неравновесный характер и обусловлен производством активных центров в результате воздействия разряда.
3. Предложен кинетический механизм поджига углеводород-кислородных смесей неравновесной плазмой наносекундного разряда, заключающийся в

промотировании цепных реакций на стадии индукции воспламенения за счёт образования активных центров продолжения и ветвления цепей на фазе разряда. Проведенное численное моделирование плазменно–стимулированного воспламенения основывалось на добавлении в начальный момент времени атомов О, Н, и радикалов типа C_nH_{2n+1} к основным компонентам горючей смеси с последующим расчётом по кинетической схеме, описывающей процесс автовоспламенения. Количество и соотношение радикалов зависело от полученных в эксперименте значений электрического поля. Показано, что наибольшее влияние на времена задержки воспламенения при реализующихся в разряде значениях электрического поля 50 – 300 Тд оказывают атомы О, бóльшая часть которых нарабатывается в процессе диссоциации молекул электронным ударом в разряде. При относительно низких начальных температурах газа существенная часть атомов и радикалов вступает в реакции с выделением тепла, при повышении начальной температуры наблюдается интенсивное развитие цепных реакций, и роль дополнительного разогрева за период индукции становится несущественна. Полученное совпадение экспериментальных и рассчитанных времен задержки воспламенения подтверждает адекватность предложенного механизма.

4. Для выяснения роли атомов кислорода при неравновесном воспламенении газовых смесей был проведен специальный цикл экспериментов и расчетов, в которых эффективность наносекундного разряда сопоставлялась с эффективностью лазерного флэш-фотолиза. В качестве поглощающего агента был выбран N_2O , возбуждение проводилось излучением ArF лазера с длиной волны 193 нм. Показано, что в результате лазерного флэш-фотолиза при начальных температурах в диапазоне $T = 1100 - 1800$ К и давлениях $P = 0.3 - 1$ атм времена задержки воспламенения в смеси $N_2O:H_2:Ar=1:1:8$ сокращаются в 2 раза, а в смеси $O_2:N_2O:H_2:Ar=3:10:30:50$ — в 4 раза по сравнению с автовоспламенением. Удельный энерговклад лазерного излучения в газ составляет 1 – 4 мДж/см³. При таких же энерговкладах разряд дает сходный эффект сокращения времен задержки воспламенения по сравнению с автовоспламенением. Рассмотрены основные кинетические процессы, отвечающие за поджиг смеси в случае разряда и в случае лазерного флэш-фотолиза; на основе численного моделирования определены основные каналы образования и гибели атомарного кислорода.

Список литературы

- [1] Н.Н.Семенов. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности. // Изд-во АН СССР, М.: 1958. 686 с.
- [2] G.Gorchakov, F.Lavrov. // Acta Physicochim. URSS 1(1934) 139-144

- [3] A.B.Leonov, D.A.Yarantsev, A.P.Napartovich, and I.V.Kochetov. // 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (Reno, Nevada, USA, 9-12 January 2006) AIAA 2006-563
- [4] A.Klimov, V.Biturin, I.Moralev, B.Tolkunov, A.Nikitin, A.Velichko and I.Bilera. // 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA-2006-617
- [5] N.B.Anikin, E.I.Mintoussov, S.V.Pancheshnyi, D.V.Roupassov, V.E.Sych, A.Yu.Starikovskii. // 41st AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, (Reno, Nevada, USA, 9-12 January 2003) AIAA-2003-1053
- [6] G.Pilla, D.Galley, D.A.Lacoste, F.Lacas, D.Veynante, and C.O.Laux. // IEEE Trans. on Plasma Science 34 (2006) 2471-2477
- [7] N.Chintala, A.Bao, G.Lou, I.V.Adamovich. // Comb. and Flame 144 (2006) 744-756
- [8] S.A. Bozhenkov, S.M. Starikovskaia and A.Yu. Starikovskii. Nanosecond gas discharge ignition of H_2 and CH_4 containing mixtures. // Combustion and Flame 133 (2003) 133-146.
- [9] S. Williams, C. Carter, S. Corera, M. Kahandawala, S. Sidhu. Model and Igniter Development for Plasma Assisted Combustion // Plasma Enhanced Combustion Workshop, Stanford University. 9 Jan 2004.
- [10] А. М. Старик, Н. С. Титова "Низкотемпературное инициирование детонационного горения газовых смесей в сверхзвуковом потоке при возбуждении молекулярного кислорода в состоянии $O_2(a^1 \Delta_g)$ " // Доклады академии наук 2001 Т.380, с. 332.
- [11] T. Tachibana // Proc. 26th (Int.) Sympos. on Combust. Napoli, 1996. WIP Abstracts. P. 385.
- [12] M. Lavid, D. Zhou, Y.-C. Li // Proc. 26th (Int.) Sympos. on Combust. Napoli, 1996. WIP Abstracts. P. 410.
- [13] H. Furutani, F. Liu, J. Hama, S. Takahashi // Proc. 26th (Int.) Sympos. on Combustion. Napoli, 1996. WIP Abstracts. P. 394.
- [14] G. Pilch, A. Britan, Bon-Dor Gabi, E. Sher // Proc. 27th (Int.) Symp. on Combust. Boulder, 1998. WIP-Abstracts. P. 95.
- [15] G.V. Naidis. // J. Phys. D: Appl. Phys. 40 (2007) 4525-4531
- [16] Н.А.Попов. // Теплофизика высоких температур 45 (2007) 296-315
- [17] А.М. Старик, Б.И. Луховицкий, Н.С. Титова. // Кинет. и катализ 48 (2007) 368-387

- [18] С.М. Стариковская. Импульсный разряд при высоких перенапряжениях: особенности развития и возбуждение внутренних степеней свободы газа. Докторская диссертация, 2000, с. 12–21.
- [19] С.А.Боженков. Исследование влияния высокоскоростной волны ионизации на воспламенение водородо-воздушных и метано-воздушных смесей. Диплом бакалавра, 2002.
- [20] Е.Н. Кукаев. Исследование воспламенения горючих смесей наносекундным разрядом и импульсным флэш-фотолизом. Диплом магистра, 2004.
- [21] S.M., Starikovskaia, E.N., Kukaev, A.Yu., Kuksin, M.M., Nudnova, A.Yu., Starikovskii. Analysis of the spatial uniformity of the combustion of a gaseous mixture initiated by a nanosecond discharge. //Combustion and Flame. 193 (2004) 177–187
- [22] J.B.A. Mitchell, Phys. Reports 186 (1990) 215–248.
- [23] R.K. Janev and D. Reiter, Phys. Plasmas 11 (2004) 780–829.
- [24] I.P. Shkarofsky, T.W. Johnston, M.P. Bachinski, The particle kinetics of plasmas, Addison–Wesley, MA, 1966.
- [25] G.J.M. Hagelaar, L.C. Pitchford, Plasma Sources Sci. Technol. 14 (2005) 722–733.
- [26] K. Tachibana, Phys. Rev. A 34 (1989) 1007–1015.
- [27] A.A. Ionin, I.V. Kochetov, A.P. Napartovich, N.N. Yuryshev, J. Phys. D: Appl. Phys. 40 (2007) 25–61.
- [28] M. Hayashi, in: L.C. Pitchford, B.V. McCoy, A. Chutjian and S. Trajmar (Eds.), Electron collision cross–sections for molecules determined from beam and swarm data, Swarm studies and inelastic electron–molecule collisions, Springer–Verlag, New York, 1987, p. 167–187.
- [29] V.P. Zhukov, V.A. Sechenov, A.Yu. Starikovskii, Comb. and Flame 140 (2005) 196–203.
- [30] E.L. Petersen, D.F. Davidson, R.K. Hanson, Comb. and Flame 117 (1999) 272–290.
- [31] H.J. Curran, P. Gaffuri, W.J. Pitz, C.K. Westbrook, Comb. and Flame 114 (1998) 149–177.
- [32] Zuev A P and Starikovskii A Yu 1992 Reactions involving nitrogen oxides. Unimolecular N_2O decomposition *Sov. J. Chem. Phys.* **10(1)** 80–99
- [33] Зуев А.П., Стариковский А.Ю. 1991 Реакции с участием окислов азота при высоких температурах. Реакции N_2O с O. *Khimicheskaiia fizika* **10(2)** 179–189

- [34] Зуев А.П., Стариковский А.Ю. 1991 Реакции с участием окислов азота при высоких температурах. Реакции $\text{NO} + \text{O} + \text{M} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{M}$. *Khimicheskaiia fizika* **10(2)** 190—199
- [35] Zuev A P and Starikovskii A Yu 1992 Reactions in the $\text{N}_2\text{O}-\text{H}_2$ system at high temperatures *Sov. J. Chem. Phys.* **10(3)** 520—40

Список основных публикаций по теме диссертации

1. Kosarev I.N., Aleksandrov N.L., Kindysheva S.V., Starikovskaia S.M., Starikovskii A.Yu. Kinetic mechanism of plasma-assisted ignition of hydrocarbons // 2008 J.Phys.D: Appl.Phys. 2008. V.41 032002 (6pp) doi:10.1088/0022-3727/41/3/032002.
2. Kosarev I.N., Starikovskaia S.M., Starikovskii A.Yu. The kinetics of autoignition of rich $\text{N}_2\text{O}-\text{H}_2-\text{O}_2-\text{Ar}$ mixtures at high temperatures // Combustion and Flame. 2007. V.151 P.61-73.
3. Starikovskii A.Yu., Anikin N.B., Kosarev I.N., Mintoussov E.I. Starikovskaia S.M., Zhukov V.P. Plasma-assisted combustion // Pure Appl. Chem. 2006. V.78 P.1265-1294.
4. Kosarev I.N., Aleksandrov N.L., Kindysheva S.V., Starikovskaia S.M., Starikovskii A.Yu. Kinetics of ignition of saturated hydrocarbons by nonequilibrium plasma: CH_4 -containing mixtures // Combustion and Flame. 2008. V.154 P.569–586.

Косарев Илья Николаевич

**Кинетика неравновесного воспламенения газовых смесей под
воздействием лазерного флэш-фотолиза и наносекундного разряда**
Автореферат

Подписано в печать 01.09.2008. Формат $60 \times 84 \frac{1}{16}$. Печать офисная.
Усл. печ. л. 1,0. Уч.- изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 21/08.

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Московский физико-технический институт (государственный университет)
Издательский сектор НИЧ МФТИ.
141700, Моск. обл., г.Долгопрудный, Институтский пер., 9