

ФИЗИЧЕСКАЯ ГАЗОДИНАМИКА

В.В. Голуб, Т.В. Баженова, Л.Г. Гвоздева, М.Ф. Иванов

В статье дан обзор полученных научных результатов в области физической газодинамики: исследований нестационарных газодинамических процессов, ударных волн в реальных газах, импульсных струй. Представлены последние достижения и перспективы исследований процессов воспламенения, детонации и плазменной аэродинамики.

ВВЕДЕНИЕ

Физическая газодинамика, в отличие от классической, исследует течения газа с учетом происходящих в нем физико-химических процессов. Исследования по физической газодинамике представляют интерес для энергетики, термоядерного синтеза, геофизики, ракетно-космической техники различных технологий. Знание законов нестационарных взаимодействий ударных волн с препятствиями нужно при разработке защиты сооружений от взрывов, для техники безопасности в шахтах, при противопожарных мероприятиях, при учете переходных процессов при запуске газодинамических установок, при учете возможного разрушающего действия ударных волн в импульсных газодинамических установках (газодинамические лазеры, аэродинамические установки, плазматроны).

Импульсные струи возникают при запуске двигателей, при коррекции траектории космических аппаратов, в импульсных лазерах, импульсных плазматронах, во время аварийных ситуаций при разрыве газонаполненных емкостей.

В настоящее время исследование нестационарных газодинамических процессов обусловлено проблемами возникновения горения, детонации и влияния выделения энергии на

поток. Эти проблемы приобрели особую актуальность в связи с перспективой развития водородной энергетики, энергетического использования детонационного сгорания топлива и плазменной аэродинамики.

ИСТОРИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Отдел физической газодинамики создан в ИВТАНе в 1967 году на основе коллектива научных сотрудников, переведенных из Энергетического института им. Г.М. Кржижановского. Этот коллектив продолжил в ИВТАНе исследования, начатые им им под руководством чл.- корр. АН СССР А.С. Предводителя в лаборатории физики горения ЭНИИа, где были рассчитаны таблицы термодинамики и газодинамики воздуха при температурах до 20000 К и созданы одни из первых в СССР ударные трубы.

Необходимость учета физико-химических процессов при течении высокотемпературного газа возникла для решения задач ракетно-космической техники для расчета нагрева баллистических ракет при движении в атмосфере. При конструировании межконтинентальной баллистической ракеты возникла проблема теплозащиты. Оценки параметров воздуха за скачком по идеальной теории показали, что температура может достигать 15000 К (!). Это требовало такого количества теплозащитного материала, что ракета не могла бы подняться. Тогда ракетчики обратились к физикам с просьбой определить температуру за скачком в реальном газе с учетом расхода энергии на вращения, колебания, диссоциацию и ионизацию молекул. С учетом термодинамики воздуха в 1953 году в Энергетическом институте АН СССР были проведены численные рас-

четыре параметра потока воздуха за прямым скачком уплотнения при температурах 200–20000 К и начальных давлениях от 1 до 10^{-5} атм. Результаты расчетов параметров воздуха за ударной волной немедленно передавались конструкторам из ОКБ С.П. Королева, которые определяли необходимое количество теплозащитного материала. Расчеты показали, что учет диссоциации снижает температуру плазмы при движении тел в атмосфере со скоростью 5 км/с с 12 000 до 4500 К (рис.1).

Исследования ударных волн и импульсных струй в реальном газе, начатые в ЭНИИ, были продолжены в ИВТАНе. В 1967 г. в составе отдела теплообмена была создана Лаборатория физической газодинамики. В 1970 году на базе лаборатории был создан Отдел физической газодинамики. В 1998 году отдел вошел в состав ИТЭС. В отделе были выделены Лаборатория нестационарных газодинамических процессов и Лаборатория неравновесных процессов. В 2006 году в состав отдела включены лаборатории – Вычислительных методов в энергетике и – нелинейных плазменных процессов.

ОСНОВНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ОБЛАСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В РЕАЛЬНЫХ ГАЗАХ [1]

В отделе проводилось экспериментальные и теоретические исследования не слабых ударных волн, для которых применимо приближение идеального газа, а сильных ударных волн, когда необходимо учитывать физико-химические превращения в газе. Рассмотрены случаи равновесного и неравновесного состояний за ударной волной, приведены данные о времени релаксации физико-химических процессов. Особо выделен часто встречающийся случай, когда течение за ударной происходит с частично замороженными степенями свободы молекул. В частности, расчеты и эксперименты, проведенные в отделе, показали, что замороженная диссоциация повышает температуру за скачком уплотнения при дви-

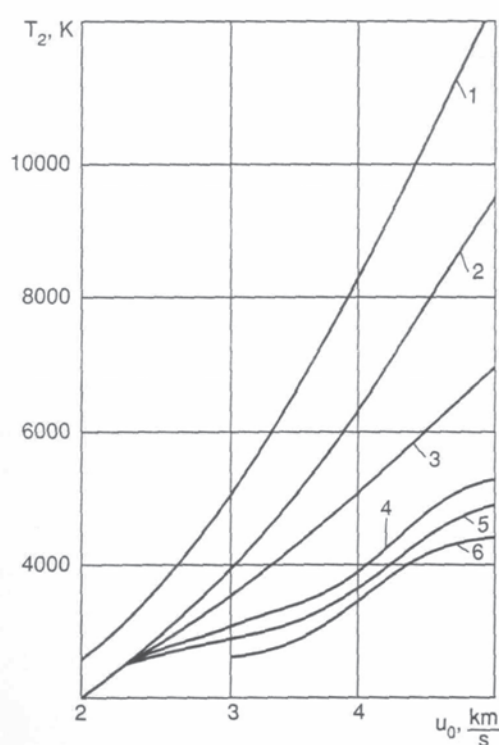


Рис. 1. Температура воздуха за головной ударной волной при движении тел в атмосфере
1 – идеальный газ, 2 – учет возбуждения колебаний, 3-6 – учет диссоциации и ионизации на высотах от 0 до 80 км

жении тел в атмосфере со скоростью 5 км/с с 4500 до 9500 К, а отсутствие равновесного возбуждения колебаний молекул до 12000 (кривая 2 на рис. 1).

В экспериментах на ударных трубах определены времена релаксации возбуждения колебаний и диссоциации молекул углекислого газа. В частности, показано, что влияние неравновесности снижает на несколько тысяч градусов температуру за фротом ударной волны при входе тел в атмосферу таких планет, как Марс и Венера. Для НПО «Энергия» было экспериментально и теоретически исследовано влияние на радиосвязь неравновесности электронных процессов в плазменной оболочке баллистических ракет и космических летательных аппаратов.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СИЛЬНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН С ЭЛЕМЕНТАМИ ПРЕПЯТСТВИЙ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН В КАНАЛАХ ПЕРЕМЕННОЙ ФОРМЫ [2,3].

Выполнены экспериментальные и теоретические исследования взаимодействий сильных ударных волн с элементами препятствий и распространения ударных волн в каналах переменной формы. Развита методика расчетов взаимодействия ударных волн с помощью приближенных и асимптотических методов применительно к распространению ударных волн в каналах с изменяющимся сечением.

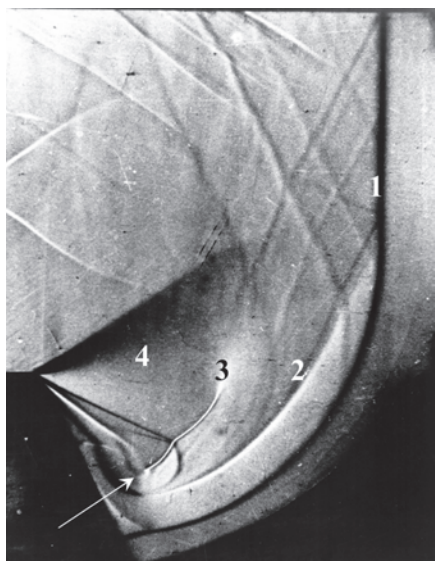
Найдены границы существования различных режимов взаимодействия отраженной ударной волны с пограничным слоем, отражения ударных волн от вогнутого угла, огибания ударной волной выпуклого угла, распространения ударных волн в сужающихся и расширяющихся каналах и в соплах с учетом физико-химических превращений в газе. Результаты использованы для расчета действия воздушной ударной волны на сооружения и технику.

- Изучен механизм перехода от регулярного отражения ударных волн к Маховскому, при котором точка отражения падающей ударной волны отходит от наклонной поверхности и давление на поверхности уменьшается. Установлены границы существования различных режимов отражения. Показано, что режим отражения с двумя трехударными конфигурациями (двойное Маховское отражение, (рис. 2)) возникает в реальном газе при невозможности плавного сопряжения отраженной волны с присоединенной волной на клине.

- Экспериментально исследовано огибание ударной волной выпуклого угла (дифракция ударной волны) (рис. 3). Получены зависимости давления на поверхности от угла поворота и числа Маха ударной волны. Показано, что причиной отрыва потока от стенки является взаимодействие волны торможения с пограничным слоем за дифрагированной волной.
- Исследовано формирование струи в сопле при запуске установки с отражаю-



Рис. 2. Отражения ударной волны от наклонной поверхности. Режим отражения с двумя трехударными конфигурациями



*Рис. 3. Отрыв потока от стенки при огибании ударной волной выпуклого угла
1 - первичная ударная волна,
2 - контактная поверхность,
3 - вторичная ударная волна,
4 - веер волн разрежения, стрелкой обозначен вихрь в конце линии отрыва*

щим соплом. С помощью приближенных и асимптотических методов проведены расчеты взаимодействия ударных волн при их распространении в каналах с изменяющимся сечением и выведены условия нестационарного отрыва потока при запуске сопла.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН С ЭЛЕМЕНТАМИ ПРЕПЯТСТВИЙ [1,3]

Методом высокоскоростной съемки исследованы закономерности отражения, преломления и дифракции детонационных волн. Показано, что характерной особенностью процесса дифракции детонационной волны является распад волны на ударную волну и фронт горения (рис.4). Восстановление фронта детонации начинает происходить, когда время пребывания частиц газа при вы-

сокой температуре становится достаточным для воспламенения.

ИМПУЛЬСНЫЕ СТРУИ [4]

Исследования структуры импульсных струй и их воздействия на преграду проводились на стендах «ДИОГЕН» (рис. 5) и «ИСТРА» (рис. 6). Установлены закономерности формирования крупномасштабных вихревых структур в осесимметричных недорасширенных импульсных струях.

В частности, установлено, что при формировании сверхзвуковой импульсной струи в диапазоне изменения нерасчетностей $n=10\div 70$, температурных факторов $\tau=0,8\div 7,5$ образуется головной крупномасштабный сверхзвуковой вихрь, глубина разрежения в котором совпадает с глубиной разрежения перед диском

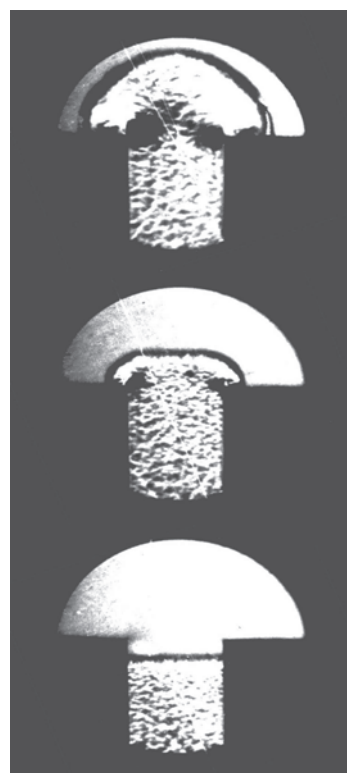


Рис. 4. Покадровая съемка теневой картины дифракции детонационной волны при выходе из канала в $\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2$ при начальном давлении смеси 1 атм

Маха (рис.7). Получены аппроксимационные соотношения, описывающие в безразмерных координатах траектории движения головных вихрей в импульсных струях азота, углекислого газа, аргона и гелия при различных отношениях температуры на срезе сопла к температуре окружающей среды.

На основе результатов экспериментального и теоретического исследования разработаны методы управления давлением на преграду при выходе ударной волны из канала с помощью изменения его геометрии. В частности, показано, что при истечении из канала с поперечным сечением крестообразной формы прямой скачек уплотнения в потоке заменяется на систему косых скачков. Сила действия увеличивается в несколько раз в зависимости от отношения высоты щелей к ширине. Это связано с уменьшением потерь полного давления на скачках уплотнения в нестационарном потоке.

Установленные закономерности открывают возможность управления полным давлением в потоке при выходе ударной волны из канала путем диафрагмирования или изменения формы его поперечного сечения. На основе полученных результатов могут быть развиты

пути управления дальностью струи, импульсом воздействия ударных волн на преграды применительно к ряду практических приложений.

ОСНОВНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ В ОБЛАСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ГОРЕНИЯ И ДЕТОНАЦИИ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ

Использование детонационного режима горения в камерах сгорания обосновано стремлением наиболее эффективно преобразовать химическую энергию топлива в кинетическую энергию продуктов сгорания. Преимуществом детонационного режима горения над дефлаграционным является более быстрое выделение энергии, что позволяет проектировать устройства с высокой удельной мощностью. Давление продуктов сгорания при детонаци-

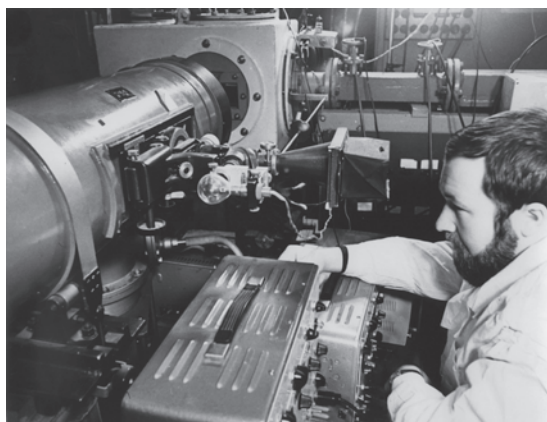


Рис. 5. Ударная труба с вакуумной камерой. (стенд «ДИОГЕН»). Визуализации картины течения производится с помощью теневого прибора ИАБ-451 и высокоскоростной камера ВСК-1

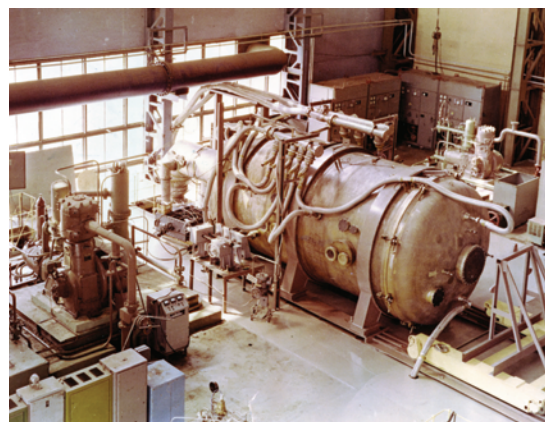


Рис. 6. Вакуумная камера большого объема (40 м^3) для моделирования импульсных высотных струй. (стенд «ИСТРА»). Вакуум без подачи газа в камеру составлял 10^{-6} мм. рт.ст. Объемная скорость откачки 10^6 л/с

онном горении топлива в несколько раз выше, чем при обычном сжигании. При этом термодинамический цикл детонационного сжигания близок по форме к циклу при постоянном объеме, КПД которого значительно превосходит КПД термодинамического цикла при постоянном давлении. Большинство работ, посвященных исследованию пульсирующих детонационных устройств, не принимают во внимание скорость и начальную турбулентность потока горючей смеси. Это потребовало решения как фундаментальных, так и прикладных проблем оптимизации детонационной камеры сгорания.

В отделе Физической газодинамики ОИВТ РАН была показана роль начальной турбулентности и скорости потока горючей смеси в процессах ускорения фронта пламени и формирования детонации. Для этой цели был создан экспериментальный стенд, позволяющий обеспечивать отдельную подачу компонентов топлива в камеру сгорания (Рис.8). Было установлено, что наличие потока со скоростью 50 м/с приводит к снижению энергии прямого инициирования детонации Чепмена–Жуге на 60% (рис. 9) [5,6].

Эксперименты показали [7], что наложение внешнего или собственного магнитного поля на область электрического разряда способно повысить мощность разрядного тока, что при критических энергиях инициирования детонации приводило к более быстрому

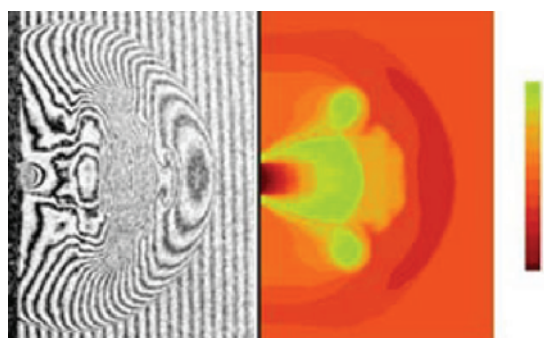


Рис. 7. Поле плотности в импульсной звуковой струе. ($p/p_0 = 18$).
а – интерферограмма,
б – численный расчет

ее формированию, а значит к более быстрому и полному выделению энергии.

Перспективным направлением дальнейшего исследования перехода горения в детонацию являются поиски путей уменьшения энергии инициирования и сокращения преддетонационного расстояния с помощью плазменных генераторов. Одной из фундаментальных нерешенных задач остается задача моделирования ускорения турбулентного пламени с переходом в детонационное горение.

Работа выполняется при частичной поддержке Программы РАН П2.

ДИФфуЗИОННОЕ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЕ ВОДОРОДА ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ИЗ РЕЗЕРВУАРА В АТМОСФЕРУ И ЗАДЕРЖКА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ

Экспериментально и численно выполнено исследование истечения водорода из резервуара под высоким давлением в открытое пространство или в трубу, заполненную воздухом [8–10]. Возникающие при импульсном истечении ударные волны способны привести к самовоспламенению водорода на границе раздела с воздухом (рис. 10) В диапазоне начальных давлений 10–150 атм определены параметры диффузионного воспламенения водорода при истечении в канал.

Совокупность имеющихся в литературе данных указывает на необходимость уточнения известных кинетических схем самовоспламенения водородосодержащих смесей при давлении выше 10 атм, а также при температуре ниже 1000 К. В условиях, когда скорости химических процессов сравниваются с временами смешения, их взаимное влияние требует точного вычисления динамики химических процессов, что требует кинетических схем, подходящих для данного режима окисления, которые в настоящее время отсутствуют. Необходимо экспе-



Рис.8 Детонационная установка с отдельной подачей реагентов, допускающая работу в частотном режиме. Конструкция установки позволяет проводить исследования как в неподвижном, так и в движущемся газе, как в заранее перемешанной смеси, так и в неперемешанных компонентах

риментальное определение фундаментальных констант химической кинетики окисления водорода в водородо-кислородных и водородо-воздушных смесях при высоком давлении водорода в нагретом окислителе. Для этого требуется провести исследование задержки воспламенения и динамики концентраций про-

межуточных продуктов в реакциях горения смесей за ударной волной при давлениях до 50 атм и температурах до 2000 К.

Работа выполняется при частичной поддержке Федерального агентства по науке и инновациям Миннауки РФ (гранту РосНаука – МК-872.2010.8)

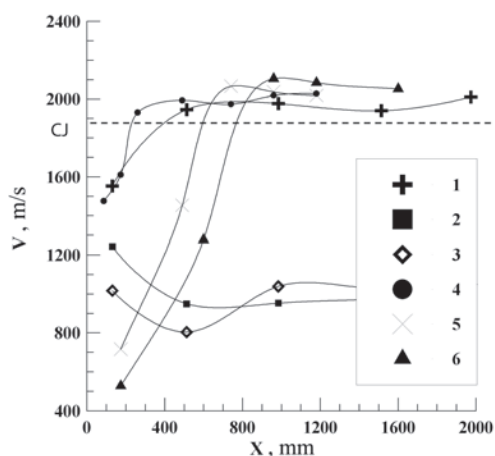


Рис. 9. Скорости ударных и детонационных волн в неподвижной (1-3) и в движущейся (4-6) со скоростью 50 м/с стехиометрической водородно-воздушной смеси. CJ – скорость детонации Чепмена-Жуге. 1 – $E = 1,35E_{кр}$; 2 – $E = 0,97E_{кр}$; 3 – $E = 0,65E_{кр}$; 4 – $E = 0,81E_{кр}$; 5 – $E = 0,5E_{кр}$; 6 – $E = 0,25E_{кр}$

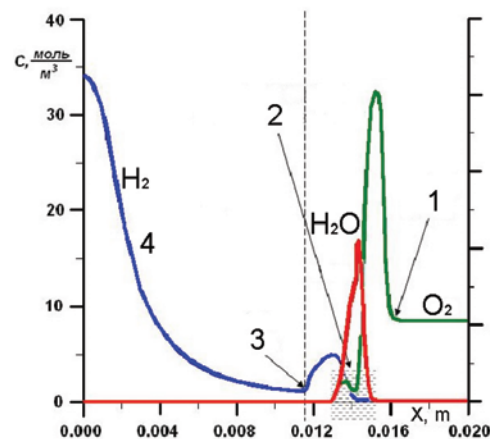


Рис. 10. Самовоспламенение импульсной струи водорода Распределение концентраций H_2 , O_2 и H_2O по оси струи. 1 – стартовая ударная волна, 2 – область смешения на кониактной поверхности, 3 – диск Маха, 4 – область изэнтропического расширения

**ОКОЛОПРЕДЕЛЬНЫЙ РЕЖИМ
ФОРМИРОВАНИЯ И
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ**

На сегодняшний день газовая детонация в каналах представляется хотя и сложным, но достаточно изученным явлением. Однако при переходе к малым масштабам, когда диаметр канала становится порядка характерного размера детонационной ячейки, возникает ряд явлений (таких как, например, спиновая или галопирующая детонация), которые невозможно объяснить в рамках имеющихся теорий. Для их описания необходимо применять модели, учитывающие трехмерный характер происходящих процессов и которые на сегодняшний момент еще окончательно не разработаны. Кроме того, граничные эффекты, такие как теплопотери в стенки (они становятся сравнимыми с тепловым эффектом реакции) и потери импульса за счет вязкого прилипания, становятся столь существенны, что оказывают значительное влияние на пределы перехода

горения в детонацию, а также пределы существования и скорость стационарной детонации. В проведенном в отделе исследовании камера сгорания представляла собой круглый канал постоянного сечения 3 мм, в одном из торцов которого размещена дополнительная секция диаметром 14,5 мм, в которой происходил поджиг смеси. За счет большего диаметра предкамеры пламя на начальной стадии распространялось не испытывая больших потерь тепла и импульса и, кроме того, дополнительно механически турбулизировалось при переходе из широкой секции в канал. Это позволяло достигнуть достаточно большой скорости пламени на входе в канал, уменьшив, таким образом, теплопотери на стенках канала, что в конечном счете позволяло получить переход горения в стационарную детонационную волну с параметрами Чепмена–Жуге в стехиометрических водород–кислородной и водород–воздушной смесях при начальных давления смеси от атмосферного и выше. Было отмечено, что при начальном давлении 1 атм в водород–

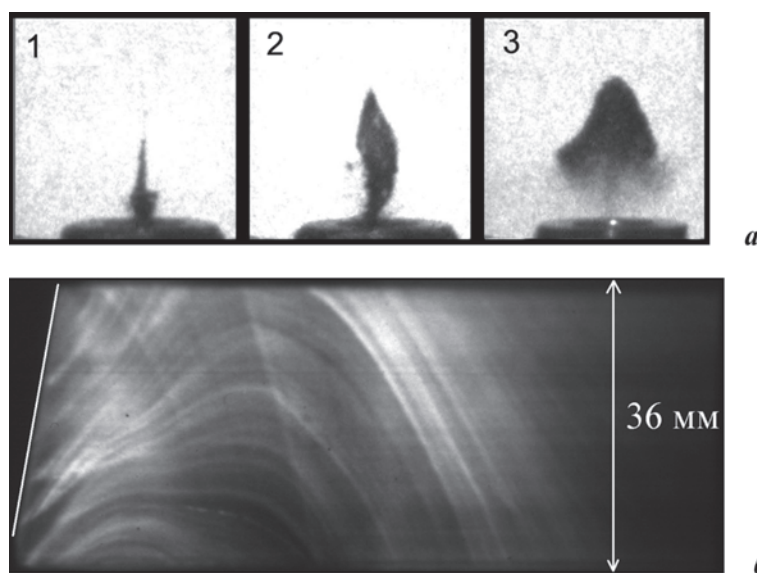


Рис. 11. а - фотографии отрыва капли от деформирующейся мембраны для различных диафрагм через 280 мкс после начала деформации диафрагмы:

1 – сталь, 0,08мм, 2, 3 – медь, 0,08 и 0,05 мм

б - запись процесса детонации в канале стрик камерой. Время развертки 600 мкс, Детонационная волна (слева) движется со скоростью 2,7 км/с

кислородной смеси детонация наблюдается уже на первом фотодатчике (36 калибров) при минимальной реализуемой в эксперименте длине широкой предкамеры 24 мм (8 калибров). Измерялась скорость отрыва капли жидкости от диафрагм различной толщины и жесткости, деформируемых детонационной волной, а также глубина проникновения струи жидкости в агарозный гель, структура которого близка к кожному покрову человека (рис. 11).

Проведенные исследования являются началом систематического изучения распространения детонации в каналах диаметром меньше размера детонационной ячейки и влияния на формирование перехода горения в детонацию геометрии канала. Также остаются не выясненными такие аспекты влияния геометрии узких каналов на переход горения в детонацию, как, например, переменное сечение канала или его изгибы. Кроме того, особый интерес представляет детальное изучение влияния потерь тепла и импульса на стенках канала на формирование и распространение детонации. Газовая детонация может использоваться в перспективных микродвигателях или в качестве источника энергии для деформирования диафрагмы в устройствах для безыгольных инъекций.

Работа выполняется при частичной поддержке РФФИ (проект 10 08 00214)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ И ДЕТОНАЦИИ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Математическая модель разработана на основе уравнений Навье–Стокса для сжимаемой среды с учетом вязкости, теплопроводности, многокомпонентной диффузии и энерговыделения за счет химических реакций. Двух и трехмерные уравнения газовой динамики решались эйлерово–лагранжевым методом, модифицированным с целью достижения

второго порядка точности как на эйлеровом, так и на лагранжевом этапе.

Первые результаты, полученные методами математического моделирования с применением разработанного компьютерного кода, позволили выявить и объяснить условия, приводящие к возникновению аномально высоких давлений при распространении слабых ударных волн или волн горения в сужающихся объемах, заполненных высокоактивной горючей смесью. Проведенное математическое моделирование доказало возможность самовоспламенения водорода в формирующейся ударной волне при аварийной разгерметизации баллонов высокого давления, причем эти результаты были получены раньше первых публикаций в зарубежной литературе [11,12]. Методами математического моделирования установлен эффект замедления процессов возгорания газообразных горючих смесей при воздействии акустических волн на зону поджига и предложен новый механизм перехода от медленного горения к детонации в каналах и трубах (совместно с М.А. Либерманом). Последний результат позволяет устранить противоречие, имеющее место в принятой теории перехода горения в детонацию, основанной на формировании перед фронтом горения, так называемых, «горячих точек». Расчеты показали, что ускоряющийся фронт волны горения в водородно–кислородной смеси создает перед собой сжатый и нагретый (до температур, недостаточных для начала активной реакции) слой свежей горючей смеси. Это в свою очередь интенсифицирует химические реакции и ускоряет фронт пламени. Давление на фронте пламени в этом случае растет экспоненциально до тех пор, пока скорость фронта не достигнет локальной скорости звука, после чего «запертые» между положением пика давления и фронта пламени возмущения приводят к резкому сверхэкспоненциальному росту давления на фронте волны дефлаграции, переводя процесс в режим пересжатой детонации.

В дальнейшем планируется использование для расчета процессов горения алгоритмов с нулевой схемной вязкостью и распараллеливание компьютерных кодов, позволяющее перейти к серийным расчетам трехмерных задач с числом ячеек до 10^7 .

Работа выполняется при частичной поддержке Программы Президиума РАН П14.

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ТЕРМИЧЕСКОГО САМОРАЗЛОЖЕНИЯ АЦЕТИЛЕНА

Одной из задач в области воспламенения газов является исследование термического разложения ацетилена, который способен воспламениться без окислителя при незначительных энергиях инициирования. В том случае, когда давление ацетилена превышает 2 атм., саморазложение может носить взрывной характер, что представляет чрезвычайную опасность при хранении и эксплуатации. Экспери-

ментально и численно изучена возможность предотвращения взрывного разложения ацетилена с помощью незначительных примесей, молекулы которого участвуют в определенных химических реакциях, замедляя или полностью прекращая процесс разложения [13]. В расчете рассматривались реакции в газовой фазе. В качестве ингибиторов рассматривались водород или смесь пропана и бутана. Определены необходимые концентрации ингибиторов, препятствующих взрывному разложению ацетилена при ударно-волновом сжатии, и их зависимость от давления. Экспериментально и численно обнаружено определяющее значение цепного механизма взрывного саморазложения ацетилена (рис. 12). Учет реакций, описывающий рост частиц может существенно дополнить знания о роли цепных реакций в химических реакциях, происходящих при давлениях, в несколько раз выше атмосферного. Механизм ингибирования пиролиза сложных углеводородов полностью неясен и требуют более подробного исследования.

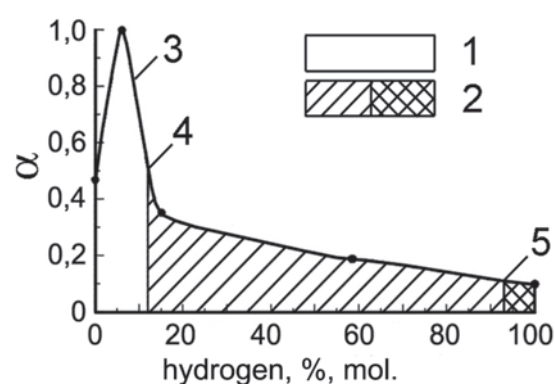


Рис. 12. Расчетная зависимость степени разложения ацетилена от концентрации водорода при ударно-волновом сжатии до 20 атм: 1 – разложение наблюдается экспериментально; 2 – разложение экспериментально не наблюдается; 3 – расчетная степень разложения ацетилена; 4 – экспериментальная граница; 5 – термодинамическая граница

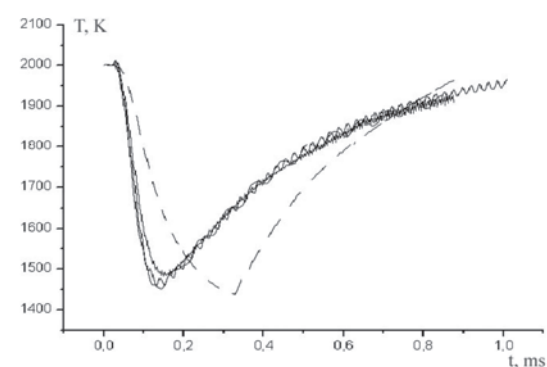


Рис. 13. Зависимость температуры очага воспламенения от времени при наличии (сплошные линии) и в отсутствие (пунктирные линии) звукового поля, частота звуковых колебаний составляла 15, 45 и 150 кГц

АКУСТИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОБЛАСТЬ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ В ГАЗАХ

Акустическое воздействие на пламя и область воспламенения в газах является актуальной темой современных исследований в области физики горения и взрыва. В отделе физической газодинамики ОИВТ РАН начат цикл работ по исследованию влияния акустического возбуждения на область воспламенения газовых смесей. Эксперимент показал [14], что в отсутствие акустического воздействия при двух значениях давления в камере сгорания детонация возникает на расстоянии около 2,5 диаметра камеры сгорания от источника зажигания. При наличии акустического поля картина развития горения отличается, ударная волна к концу четвертого калибра камеры сгорания разгоняется до скорости около половины детонационной. Это объясняется более быстрой релаксацией крупных вихревых структур и первых очагов детонации под действием акустического поля. На рис.13 представлены зависимости температуры очага воспламенения от времени при наличии и в отсутствие звукового поля. На начальной стадии процесса воспламенения звуковые волны ускоряют процесс остывания очага горения, а затем приводят к более быстрому нарастанию температуры и развитию неустойчивости фронта. Картина падения и роста максимальной температуры в очаге возгорания, слабо зависит от частоты волн. В случае бедных смесей наблюдается значительно более сильное влияние акустических волн на развитие процесса горения. В частности, возможно дробление фронта пламени и возникновение локальных очагов горения.

В настоящее время нет точного решения задачи горения распыленного жидкого топлива, поэтому требуется достаточный объем экспериментальных данных для разработки приближенных методов, адекватно описывающих процесс. В дальнейшем планируется про-

ведение масштабных исследований зажигания и горения углеводородных топлив в воздухе, а также акустического воздействия на область распыла и горения с целью определения влияния акустического поля на горение парок капельной взвеси в воздухе и диффузионный перенос активных радикалов в области пламени.

Применение акустического воздействия на область воспламенения перспективно для использования в двигателях внутреннего сгорания, камерах сгорания воздушно-реактивных и ракетных двигателей, в горелочных устройствах технологических печей. Акустическое воздействие на область горения позволяет стабилизировать пламя, увеличить полноту сгорания топлива и снизить содержание оксидов азота, монооксида углерода и сажи в продуктах сгорания.

Работа выполняется при частичной поддержке Программы РАН ОЭ1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕЧЕНИЙ, ОБРАЗОВАННЫХ СИЛЬНЫМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПОЛЯМИ, С НАБЕГАЮЩИМ ПОТОКОМ ВОЗДУХА

Перспективным направлением развития аэродинамики является плазменное управление потоком. Одним из направлений исследований является изучение газодинамических процессов при обтекании потоком воздуха аэродинамического тела в сильных электрических полях. Результаты исследований могут быть полезны при проектировании самолета нового поколения. Исследуются способы предотвращения отрыва потока воздуха от поверхности крыла, уменьшения времени жизни вихревого следа самолета, создания дополнительных управляющих усилий при критических углах атаки. Был разработан метод управления параметрами дозвукового и сверхзвукового течения воздуха вблизи поверхности аэродинамического тела

с помощью импульсно–периодического зажигания электрического разряда и создание равновесной плазмы. При этом за времена порядка микросекунд в небольшом пространстве на поверхности тела выделяется достаточное количество тепла для того, чтобы изменить картину течения вблизи места инициирования разряда. С помощью особой конструкции разрядника, т.н. секционированного разрядника, на поверхности тела создается электродуговой разряд по проводящей поверхности с частотой от нескольких Герц до нескольких тысяч Герц, с энергией в каждом импульсе от сотен Джоулей до одной сотой Джоуля соответственно. Получены критические параметры инициирования электродугового разряда: диапазон чисел Маха и значений статического давления в набегающем потоке воздуха. Инициирование разряда приводит к изменению картины течения вблизи поверхности тела и созданию дополнительных управляющих усилий. Были проведены эксперименты по инициированию диэлектрического барьерного разряда (ДБР). С помощью асимметричной конфигурации электродов удалось получить течение с характерной скоростью порядка 10 м/с вблизи поверхности при инициировании ДБР. Неболь-

шая добавка к скорости в пограничном слое изменяет картину течения в целом, например, предотвращает отрыв потока, и, как следствие, улучшает аэродинамические характеристики летательного аппарата. Впервые получена детальная структура течения в приэлектродной области с пространственным разрешением 0,07 мм. На рис. 14 представлено измерение распределения скорости в потоке, индуцированном в воздухе при атмосферном давлении и максимальной напряженности электрического поля 10^7 В/м. Впервые показано, что помимо основного вихря, возникает вторичный вихрь вблизи внешнего электрода актуатора.

Планируется проведение исследования процессов взаимодействия вихревых течений со скачками уплотнения и вихрями, создаваемыми с помощью электрических разрядов; исследование процессов ионизации воздушных потоков средней и высокой плотностей, включая зону вихревых течений; исследование новых принципов управления переходом ламинарного пограничного слоя в турбулентный; влияние плазмы на свободный пограничный слой и снижение шума струи ТРД.

Работа выполняется при частичной поддержке Программы РАН П2.

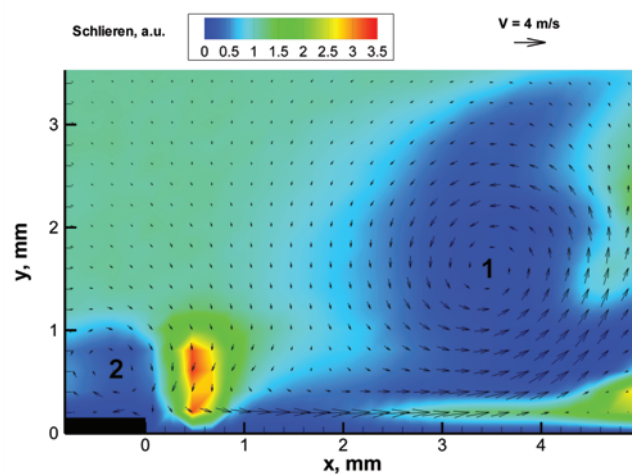


Рис. 14. Распределение скорости и градиента плотности в потоке частично ионизированного газа при амплитуде напряжения 3 кВ в момент времени 4 мс после начала разряда. $y = 0$ - диэлектрическая поверхность разрядника, $(x,y) = (0,0)$ - край электрода

ЛИТЕРАТУРА

1. Баженова Т. В., Гвоздева Л. Г. Набоко И.М. и др. Ударные волны в реальных газах. М.: Наука, 1968. 198 с.. Англ. версия: . T.V. Bazhenova. Shock swaves in real gases. Berlin.: Springer Verlag, 1973.
2. Баженова Т. В., Гвоздева Л. Г. Нестационарные взаимодействия ударных волн М., «Наука», 1977, 274 с.. Англ. версия: T.V. Bazhenova, L.G. Gvozdeva, N.A. Nettleton. Unsteady interactions of shock waves. // Prog. In Aerospace Sc. 1984. V 21. N 4.
3. Нестационарные взаимодействия ударных и детонационных волн в газах / ред. Коробейников В.П.. М.: Наука, 1986. 206 с. Англ. версия: . V.P. Korobeinikov (ed.) Unsteady interactions of shock and detonations waves in gases. N.Y.:Hemisphere Publ. Corp., 1989.
4. В.В. Голуб, Т.В. Баженова. Импульсные сверхзвуковые струйные течения М.: Наука. 2008. 279 с.
5. Баженова Т. В., Голуб В. В., Лю Ф. и др. Получение газовой детонации с повышенными параметрами на установке с отдельной подачей реагентов. Хим. Физ. 2003. Т.22. N8. С.38.
6. Гвоздева Л.Г., Бакланов Д.И., Головастов С.В. и др. Переход горения в детонацию в турбулентном потоке в пульсирующем детонационном двигателе // Хим. Физ. 2005. Т.24. N7. С. 5.
7. Аксенов В.С., Голуб В.В., Фортов В.Е. и др. Исследование влияния магнитного поля на инициирование детонации искровым разрядом в водородо-воздушной смеси //ДАН. 2005. Т. 404. N3. С. 326.
8. . Баженова Т. В., Голуб В. В., Иванов М. Ф. и др.. Ударно-волновой механизм самовоспламенения водорода при внезапном истечении из резервуара под высоким давлением.// ТВТ. 2007. Т. 45. N5. С. 733.
9. Головастов С.В., Бакланов Д.И., Голуб В.В., и др. Экспериментальное исследование диффузионного самовоспламенения водорода в канале. //Хим. Физ. 2009. Т. 28. N5. С. 185.
10. S.V. Golovastov, V.V. Golub, D.I. Baklanov, et al. Experimental and numerical investigation of hydrogen gas auto-ignition // International Journal of Hydrogen Energy. 2009. V.34, Issue 14, P.. 5946..
11. Баженова Т. В., Голуб В. В., Иванов М. Ф. и др. Самовоспламенение горючего газа при импульсном истечении его в окислительную среду // ПЖТФ. 2006. Т. 32. вып. 6. С. 77.
12. Golub V. V., Golovastov S.V., Ivanov M. F. et al. Shock-induced ignition of hydrogen gas during accidental of technical opening of high-pressure tanks. // Journal of Loss Prevention. 2007. V. 20. N 4–6, P 439.
13. Бакланов Д.И., Головастов С.В., Голуб В.В. и др. Ингибирование взрывного разложения ацетилена // Хим. Физ. 2008. Т.22. N.10. С.44.
- 14.. Благодатских Д.В, Голуб, В.В., Иванов М.Ф. и др. Влияние акустических волн на зону воспламенения и переход горения в детонацию: эксперимент и расчет // ТВТ. 2009. Т.47. N2. С.315.