

УДК 534.222.2;662.612.32

РАЗВИТИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО МЕХАНИКЕ РЕАГИРУЮЩИХ ГОМОГЕННЫХ И ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД В ИТПМ СО РАН

В. М. Фомин, А. В. Фёдоров

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090 Новосибирск
fomin@itam.nsc, fedorov@itam.nsc.ru

Дан краткий обзор исследований в области механики реагирующих сред, выполненных в ИТПМ СО РАН (АН СССР) с конца пятидесятых годов прошлого века по настоящее время.

Ключевые слова: горение, воспламенение, детонация, гомогенная/гетерогенная среда, физическое и математическое моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Первый номер журнала «Научно-технические проблемы горения и взрыва», вышедший в 1965 г., открывался статьей академика Михаила Алексеевича Лаврентьева «За дальнейшее развитие исследований в области физики горения и взрыва» (начиная с третьего номера журнал стал выходить под современным названием «Физика горения и взрыва»). М. А. Лаврентьев указал, в частности, что выход данного журнала обусловлен необходимостью ответа на вызовы науки и техники взрыва, горения и детонации в различных средах, в том числе в газовых, конденсированных (жидких и твердых) и двухфазных. В его работе были сформулированы некоторые крупные задачи, стоящие в данной области знания перед исследователями. Мы попытаемся дать краткий обзор исследований по механике реагирующих гомогенных/гетерогенных сред, выполненных в ИТПМ СО АН СССР / ИТПМ СО РАН начиная с его основания до настоящего времени, в которых в той или иной степени затронуты упомянутые и некоторые иные проблемы.

Как известно, исследование процессов физико-химических превращений представляет интерес для таких отраслей хозяйства, как аэрокосмическая техника, химическая, горнодобывающая промышленность и т. д., т. е. всюду, где в качестве рабочих тел используют смеси химически активных газов и газовзвесей. При этом, как всегда, развитие того или иного раздела механики реагирующих сред как в институте, так и в науке в целом было обусловлено запросами новой техники. В качестве таких

вызовов можно отметить следующие крупные проекты:

разработка парогазовой установки ПГУ ИТПМ СО АН СССР и фундаментальные проблемы структуры газофазных пламен, газогорелочные устройства, вопросы горения в сверхзвуковых потоках (горение водорода в прямоточных двигателях со сверхзвуковым горением), новый комплекс аэродинамических труб ТС, ИТ-301 (импульсная труба), методы математического моделирования для исследования турбулентных сверхзвуковых течений реагирующего газа;

химические и газодинамические лазеры;

двигатели внутреннего сгорания с высокофорсированными двигателями, фундаментальные и прикладные вопросы горения рабочих тел ракетных двигателей твердого топлива (РДТТ), в том числе с металлизированными добавками;

воспламенение, горение и детонация гомогенных/гетерогенных систем, связанные с проблемами объемного взрыва пылевзвесей.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИКИ РЕАГИРУЮЩИХ СРЕД

Работы в области энергетики. Парогазовая установка

Исследование процессов химических превращений в парогазовой установке ПГУ 200-750/70 было инициировано академиком С. А. Христиановичем. Идея создания парогазовых установок, использующих в качестве рабочих тел смесь продуктов сгорания топлива и водяного пара, привела к существенному

повышению КПД энергетических установок. Работы велись в направлении создания камер сгорания и смешения, газификации тяжелых жидких топлив (нефтяных остатков), а также автоматизации создаваемых технических устройств (малых и крупных ПГУ). Осенью 1959 г. был завершен цикл расчетных исследований схем ПГУ на газовом, жидком и твердом топливе. В ходе исследований было налажено взаимодействие с Казахским институтом энергетики — по камерам смешения, с Энергетическим институтом им. Г. М. Крижановского и Киевским политехническим институтом — по камерам сгорания. В ИТПМ в эти годы создавалась крупномасштабная экспериментальная база (большой стенд ПГУ и стенд газификации).

Отметим, что 1960–1965 гг. стали годами интенсивной исследовательской и конструкторской работы института, проводимой в области энергетики на основе фундаментальных научных исследований процессов горения и тепло- и массообмена. Здесь решались вопросы о скорости распространения пламени в турбулентном потоке и о влиянии на нее термодинамических параметров рабочих смесей. При этом исследовалось воздействие турбулентности на ламинарный фронт пламени, найдены приложения теории подобия к описанию процессов, протекающих в реагирующих потоках в каналах сложной геометрии. В частности, было показано, как происходит деформация ламинарного пламени, каким образом она влияет на скорость распространения фронта. Доказано существование критических градиентов скорости, определяемых характерным временем горения.

Теория подобия нашла свое приложение и в описании реагирующих течений в технических устройствах: параметры камер сгорания могут быть описаны в основном таким критерием, как отношение характерных времен горения и течения. На этом базисе был выполнен комплекс экспериментальных и теоретических работ, позволивших описать геометрию и устойчивость гомогенных и диффузных пламен некоторых реагирующих смесей. На основании результатов специального эксперимента составлены и опубликованы таблицы характерных времен горения (1968 г.).

Многие из работ по аэрогазодинамике газогорелочных устройств, теплообмену и смешению не получили окончательного завершения в связи с отъездом академика С. А. Христиано-

вича в Москву и с последовавшим за этим изменением тематики института.

Горение в сверхзвуковых потоках

С приходом в институт академика В. В. Струминского началось интенсивное исследование горения в сверхзвуковых потоках, что было связано, в том числе, и с проблемой создания гиперзвуковых прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ГПВРД). Это потребовало создания новой экспериментальной базы и разработки новых физико-химических математических моделей. Помимо исследования сверхзвукового горения, уделялось внимание процессам в двигателях внутреннего сгорания на водороде (1967 г.), диффузионным крупномасштабным пламенам при сверхзвуковом истечении. Было завершено описание геометрии и устойчивости диффузионных пламен разных топлив и окислителей с учетом различных факторов, в том числе их термодинамических параметров, спутности и подъемных сил. Вновь определялась фундаментальная интегральная характеристика реагирующих смесей — характерное время горения.

С этим периодом деятельности института связано появление нового комплекса аэродинамических труб и специализированных установок, в том числе и высокоэнтальпийных (ТС, ИТ-301), а также новых систем диагностики и автоматизации. Значительным преимуществом импульсных труб были их более высокие рабочие параметры по сравнению с традиционными установками, что потребовало улучшения возможностей новых диагностических методов.

Импульсная аэродинамическая труба (ИТ-301) создавалась как средство аэродинамических испытаний моделей ГПВРД и их воздухозаборников. При этом в течение многих лет установка ИТ-301 и ее модернизированный вариант с мультипликатором ИТ-302 использовались для исследования малоразмерных двигателей при гиперзвуковых скоростях полета. В этот период начинается систематическое использование методов численного моделирования турбулентных сверхзвуковых реагирующих течений смесей реагирующих газов. По результатам проведенной работы в 1976 г. была опубликована монография «Двумерные турбулентные течения реагирующих газов». В этот же период в институте нача-

лись исследования газодинамических лазеров, инициированные В. В. Струминским.

Следующий этап развития исследований в описываемой области связан с именем чл.-корр. Р. И. Солоухина. Его исследования подробно описаны в «Инженерно-физическом журнале», посвященном 80-летию со дня его рождения (2010, т. 83, № 6). Здесь мы отметим лишь, что получили свое дальнейшее развитие темы, связанные со сверхзвуковым горением. Были продолжены также работы по математическому моделированию с использованием схем детальной химической кинетики, в том числе и в приложениях к химическим и газодинамическим лазерам. В области экспериментальных исследований быстропротекающих процессов и реагирующих течений значительное внимание уделялось использованию оптических методов диагностики.

В это время в институте началось изучение процессов в двигателях внутреннего сгорания (высокофорсированные дизели). Была создана установка типа бомбы постоянного объема с прозрачными плоскими днищами, рассчитанная на давление до 100 атм и температуру до 1000 °С, с устройством единичного впрыска. С ее помощью обнаружены некоторые особенности развития нестационарных процессов горения, в том числе определено время задержки воспламенения ряда жидких топлив в широком диапазоне параметров, что весьма важно при проектировании конкретных изделий. Установка быстрого сжатия с прозрачным поршнем и днищем позволяла использовать оптические методы исследования при сжатии в цилиндре двигателя и моделировании скорости изменения параметров. В 1983 г. в институте был организован Первый Международный семинар по структуре пламен. По его завершении принято решение о регулярном проведении таких семинаров с периодичностью раз в три года. В настоящее время этот семинар проводится как в нашей стране, так и за рубежом.

До 1990 г. были выполнены значительные циклы работ по изучению сверхзвукового горения и тягово-экономических характеристик прямоточных двигателей. Результаты исследований опубликованы в журналах, монографиях и сборниках научных трудов [1–7]. Естественно, что в силу ограничения объема журнальной статьи приведенный в статье список литературы не является исчерпывающим. Научные достижения в данной области неоднократно

отмечались премиями и правительственными наградами. В 1985 г. исследователям была присуждена премия Совета министров СССР, а в 1991 г. — Государственная премия СССР.

Следующий этап развития исследований связан с именами академика Н. Н. Яненко, чл.-корр. В. Г. Дулова и академика В. М. Фомина. В это время были начаты исследования внешнего горения в сверхзвуковом потоке. Особое внимание стало уделяться методам математического моделирования процессов сверхзвукового горения, высокоскоростного соударения, гетерогенной детонации реагирующих аэродисперсных систем, проблемам горения металлизированных твердых топлив, ракетным двигателям твердого топлива. Был создан современный по тем временам вычислительный центр, развита система автоматизации аэродинамического и иного эксперимента. Остановимся на некоторых полученных результатах.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

В 1970–1980-е годы в ИТПМ СО РАН широко исследовались газодинамические и тепловые процессы в твердотопливных ракетных двигателях в интересах отрасли, в том числе для НПО «Алтай», НПО «Искра», Государственного ракетного центра им. акад. В. П. Макеева и др. Была создана экспериментальная база, состоящая из нескольких газодинамических установок: тепловая сверхзвуковая аэродинамическая труба Т-333 для работы при высоких числах Рейнольдса; установка РД; весовая дифференциальная установка ДФ; горизонтальная струйная установка ГСУ. В совокупности эти установки позволили провести комплекс исследований, включающий определение газодинамических, тепловых, расходно-тяговых и энергетических характеристик ракетных двигателей различного назначения. Эксперименты проводились с использованием в качестве рабочего тела холодного сжатого воздуха. Остановимся на некоторых результатах данного направления, полученных в 80-е годы. В кооперации с отраслевыми КБ и НИИ выполнено комплексное экспериментальное параметрическое исследование газодинамики двухфазных течений в соплах больших степеней расширения на крупноразмерном модельном РДТТ. Сравнение с экспериментальными данными,

полученными в огневых стендовых испытаниях на ОП-500, который успешно используется и в настоящее время в НПО «Алтай», и на ряде натуральных крупногабаритных двигателей, показало удовлетворительное соответствие результатов, что доказало адекватность использованного подхода. Это позволило дать практические рекомендации для выбора энергетически более эффективных сопел. Впервые была разработана методика расчета газодинамических усилий на выдвигных направляющих цилиндрах раздвижных сопел РДТТ с телескопическими насадками. Учтены составляющие усилия от трения эффективного газового потока, от затекания струи в полость между насадком и цилиндром и от передачи импульса от частиц к стенке цилиндра в динамике его выдвижения. Результаты исследований внедрены в деятельность заинтересованных КБ, разрабатывающих новые конструктивные схемы сопел с изменяемой геометрией, для проведения расчетов характеристик двухфазного течения на стенке сопла, параметров выпадения частиц и составляющих газодинамических усилий, возникающих при взаимодействии двухфазного потока со стенкой направляющего цилиндра телескопического сопла в широком диапазоне определяющих параметров. На основе сопоставления с имеющимися опытными данными показана удовлетворительная работоспособность программы. Расчетно-экспериментальные исследования газодинамики трехмерных течений и теплообмена в поворотных управляющих соплах позволили выявить тонкую структуру течения. Разработана методика экспериментального определения энергетической эффективности модельных сопел на весовой дифференциальной установке ДФ, основанная на сравнении реактивных тяг двух сопел, обращенных во взаимно противоположные стороны и установленных на одной продольной оси. Выявлены потери удельного импульса тяги определенных типов сопел, и на основе сравнения с имеющимися опытными данными огневых стендовых испытаний показана удовлетворительная работоспособность методики.

Разработана методика экспериментального определения специфических составляющих потерь удельного импульса тяги сопла, обусловленных утечкой газа через щели между «лепестками» насадка. Впервые получены экспериментальные распределения этих потерь в

зависимости от величины зазора. Предложена оценка составляющей потерь удельного импульса тяги сопла с лепестковым насадком за счет потери массы через зазоры между лепестками. В ходе экспериментального исследования газодинамики внешнего и внутреннего обтекания сопла РДТТ изменяемой геометрии со складываемыми лепестковыми насадками в динамике разворота лепестков выявлена качественная картина сложного течения. Проведен анализ физических особенностей течения и газодинамических ситуаций, соответствующих различным положениям лепестков в динамике их разворота. Разработана методика расчета газодинамических усилий на складываемых лепестковых насадках сопел в спутном потоке. Показано, что практически во всех фазах разворота лепестков поток оказывает положительное воздействие на этот процесс.

Течение двухфазных смесей в РДТТ

Для моделирования стационарных течений в газодинамическом тракте РДТТ были разработаны численные методики расчета осесимметрических и пространственных однофазных и двухфазных течений в соплах Лаваля для модели идеального газа, позволившие с высокой точностью определить интегральные характеристики сопел (коэффициент расхода, удельную тягу сопла), а также структуру течения и влияние на нее различных конструктивных особенностей входных частей сопел (утопленные сопла) или способа ввода продуктов сгорания (закрученные течения). Реальные свойства рабочей среды учитывались в рамках решения сопряженной задачи вязко-невязкого взаимодействия (турбулентный пограничный слой) и путем рассмотрения равновесных и неравновесных химических реакций в несущем газе. Вторая фаза представляла собой полидисперсные частицы оксида алюминия размером от долей до сотен микрометров, и движение ее описывалось в рамках континуального подхода. При этом учитывались процессы коагуляции и дробления частиц, их кристаллизации в сверхзвуковой части сопла и выпадение на стенку как при наличии, так и в отсутствие продольной перегрузки. Предложенные новые модели дробления частиц конденсата позволили более точно определять уровень двухфазных потерь в соплах и место выпадения частиц на стенку в сверхзвуковой части сопла. Путем решения сопряженной зада-

чи исследовано разрушение стенки сопла под воздействием тепловых и химических факторов высокотемпературного потока продуктов сгорания. Однако более значительным по своим разрушительным последствиям оказалось взаимодействие частиц с материалом стенки сопла, для приближенной оценки которого была предложена соответствующая математическая модель.

Моделирование пространственных двухфазных течений в поворотных соплах позволило исследовать управляющие характеристики таких сопел. В частности, было установлено, что наличие второй фазы приводит к уменьшению коэффициента разворота вектора тяги, что связано с инерционностью частиц. Расчеты пространственных двухфазных турбулентных течений в каналах заряда твердого топлива с поперечным сечением сложной формы (типа «звезда») с учетом процессов коагуляции и дробления показали значительную неравномерность в распределении концентрации частиц и их среднемассовых размеров по сечению заряда, что было подтверждено экспериментами. Следствием этого являются рост потерь удельного импульса и более интенсивное выпадение частиц на контур сопла.

При изучении течений гетерогенных смесей в каналах технических устройств (применительно к РДТТ) было обнаружено крайне интересное явление холодного газодинамического напыления. Суть его заключается в том, что частицы высокоскоростного гетерогенного потока при его взаимодействии с обтекаемыми поверхностями при некоторых условиях отлагаются на поверхностях, т. е. образуют прочный слой напыляемого материала. Однако эта тема выходит за рамки данного обзора.

Моделирование воспламенения застойных зон в камере сгорания

Известно, что в двигателестроении интерес вызывали РДТТ с комплексной геометрией камеры сгорания, т. е. двигатели с зарядами зонтичного типа и утопленными сопловыми блоками. Для расчета течений в подобных технических устройствах в институте была разработана методика, основанная на рассмотрении устройств как системы стыкующихся каналов. На базе проведенных исследований стало возможным моделировать внутрикамерные процессы воспламенения и выхода на стационарный режим РДТТ сложных конфигураций.

Для решения этой проблемы разработан комплекс программ расчета пусковых переходных режимов работы РДТТ с застойными зонами.

Агломерация металла в волне горения

Горение практически всех металлизированных смесевых твердых топлив сопровождается накоплением и агломерацией частиц на реагирующей поверхности топлива. Для разработки математической модели агломерации была создана тепловая теория воспламенения металлических частиц в газах, основанная на известных из литературы экспериментальных данных. Было установлено, что дисперсность частиц перхлората аммония значительно влияет на степень агломерации алюминия и ряд других факторов, касающихся механизмов исследуемого явления. Указанные зависимости качественно согласуются с результатами экспериментов разных авторов. Предложенная модель позволяла оценивать средние размеры агломератов в зависимости от состава смесевых твердых топлив, давления в камере сгорания, скорости горения, дисперсности и фракционного состава частиц окислителя.

Влияние напряженно-деформированного состояния на скорость горения смесевых твердых топлив

Эффект воздействия напряженно-деформированного состояния на интенсивность горения различных ракетных топлив известен еще с 1960-х годов. Исходя из представлений молекулярно-кинетической теории термостойкости и долговечности для твердых полимеров и низкомолекулярных резиноподобных полимеров в институте было показано, что в результате приложенного напряжения и активизации химических связей полимерной матрицы возрастает скорость ее термической деструкции и это является главной причиной увеличения скорости горения смесевое твердого топлива при одноосном растяжении.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕРАВНОВЕСНЫХ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ В ПЛАМЕНАХ

В технических приложениях необходимы фундаментальные знания о кинетике протекающих в газообразных и смесевых твердых топливах химических процессов, чтобы описывать

скорость горения всё возрастающего количества композиций с определенными свойствами. Были разработаны математические модели неравновесной газовой динамики с учетом вязкости и теплопроводности и использованием детальной кинетики химических реакций. Были не только получены результаты в области вычислительной математики (например, на основе уравнений Эйлера и метода Годунова разработана маршевая схема расчета стационарных сверхзвуковых течений), но и на их основе установлены некоторые новые данные по воспламенению при сверхзвуковом горении водородовоздушной смеси в канале. Кроме того, была разработана методика расчета течений неравновесного вязкого теплопроводного газа. Развитые математические технологии позволили с определенной полнотой и общностью определять структуру пламен таких энергетических материалов, как AP, RDX, AND и их производные. Исследования проводились совместно сотрудниками ИТПМ и ИКиГ СО РАН (последними выполнены эксперименты).

Гетерогенные среды

После прихода в институт академика Н. Н. Яненко получили развитие исследования по движению смесей газа и твердых частиц в каналах технических устройств и начато изучение объемного взрыва мелких частиц металлов и органической пыли (алюминий, магний, уголь), капель углеводородного топлива в среде окислителя. Данная тематика важна с позиций взрыво- и пожаробезопасности в промышленности и иных технических приложениях. Разработанная для этого иерархия физико-математических моделей механики реагирующих двухскоростных двухтемпературных гетерогенных потоков и комплекс экспериментальных установок, оснащенных быстродействующей оптической диагностической аппаратурой на основе лазерного стробоскопа, позволили получить новые данные по воспламенению и детонационному сгоранию газозвесей металлов, угля и капель углеводородов за проходящими и отраженными ударными волнами. Это послужило научной основой обеспечения взрыво- и пожаробезопасности работ на промышленных производствах, использующих в качестве рабочих тел реагирующие газозвеси. В качестве примера можно привести взрывы угольной пыли в шахтах при наличии в воздухе примеси метана. Заметим, что вопросы безопасности

в угольных шахтах впервые были поставлены С. А. Христиановичем в его классических работах о внезапном выбросе угля и газа. Кроме того, это связано с прикладными задачами создания высокоэффективных камер сгорания, усовершенствованием и разработкой новых типов двигателей внутреннего сгорания, задачами подавления детонации и многими другими фундаментальными процессами в механике, теплофизике, теории тепло- и массообмена. Для предотвращения подобных нежелательных явлений и оценки последствий катастрофических взрывов в промышленности необходимо создание научных основ безопасной работы различных технических устройств в условиях запыленной среды и в пористых средах, а также для выработки научно обоснованных критериев взрыво- и пожаробезопасности.

Теоретические и экспериментальные исследования гетерогенных течений проводились на основе подхода механики взаимодействующих континуумов, включающего использование аналитических и численных методов механики гомогенных и гетерогенных сред, а также новых методов лазерной диагностики высокоскоростных высокотемпературных потоков.

Основная проблема механики реагирующих гетерогенных сред связана с взаимодействием процессов воспламенения и горения дисперсных и ультрадисперсных реагирующих/нерагирующих частиц с динамикой их перемешивания, движения и теплообмена с несущей газовой средой в условиях высокоскоростных высокотемпературных одномерных и плоских нестационарных течений и ограниченности облаков частиц. В ИТПМ СО РАН разработана иерархия математических моделей движения смесей в двухскоростном двухтемпературном приближении механики гетерогенных сред и соответствующих численных высокоточных методов расчета, основанных на подходах TVD, SIP и др., а также на использовании экономичных решателей жестких систем кинетических уравнений. Для верификации моделей и выяснения механизмов исследованных явлений были проведены лабораторные физические эксперименты по измерению локальных параметров движения газа и частиц и также таких интегральных параметров, как время задержки воспламенения, время горения конечных облаков дисперсных и ультрадисперсных частиц металлического и органического происхождения в потоках газа.

Перемешивание газовзвесей

Первые экспериментальные работы по актуальной для вопросов взрыво- и пожаробезопасности проблеме перемешивания слоев пыли под действием ударной волны (УВ), т. е. проблеме взаимодействия слоя пыли, находящегося на плоской поверхности, с проходящей вдоль поверхности ударной волной, относятся в мировой литературе к началу 1960-х годов и были направлены на выявление основных механизмов, приводящих к подъему и распылению частиц. В ИТПМ СО РАН в течение ряда лет велись работы по физическому и математическому моделированию данного явления в рамках механики гетерогенных сред в двух подходах: в режиме одиночных частиц и при использовании теории взаимодействующих континуумов. Были построены математические модели, принимающие во внимание силу аэродинамической интерференции, возникающую при групповом полете частиц, силу Саффмана и др. Это позволило описать подъем частиц без задания различных обременительных условий, свойственных такого рода моделям, и описать данные экспериментов ИТПМ СО РАН, связанных с подъемом частиц оргстекла, бронзы и т. п. в умеренных УВ. В последующем эта математическая модель была обобщена на случай режима взаимопроникающих континуумов и верифицирована для описания таких важных для приложения явлений, как воспламенение газовзвеси угля, поднимающейся под действием лидирующих УВ. Это позволило использовать данную математическую технологию для прогнозирования воспламенения в производственных условиях угольных шахт при технологических и катастрофических взрывах. Кроме того, при использовании модели выявлено три возможных механизма поднятия частиц пыли с твердой подложки: за счет искривления УВ в слое; вследствие образования мощного вихря на кромке облака/слоя частиц; из-за неустойчивости Кельвина — Гельмгольца сдвигового слоя, развивающейся в стратифицированном слое при большом времени развития процесса под действием внутренних УВ и внешних возмущений.

Предложенные математические модели механики гетерогенных сред для описания подъема пыли из слоя под действием лидирующей УВ прямоугольной и треугольной формы с учетом процессов переноса были верифицированы по экспериментальным зависимостям

давления на подложке от времени в плоской и одномерной геометрии задачи.

ТЕОРИЯ ГЕТЕРОГЕННОЙ ДЕТОНАЦИИ

С конца 60-х годов прошлого столетия различными авторами проводятся эксперименты по распространению детонационноподобных режимов горения в смесях кислорода/воздуха и капель углеводородов, частиц алюминия, угля, крахмала. Данные этих опытов актуальны с точки зрения взрыво- и пожаробезопасности запыленных производств, и появилась необходимость создания теории объемного взрыва. Результаты свидетельствовали, что при некоторых условиях поджигания смесей (электрической искрой, взрывом конденсированного ВВ) в них развивается самоподдерживающийся режим сверхзвукового горения. Были определены зависимости скорости детонации от содержания частиц в смеси, критические энергии инициирования, время установления детонационного режима и некоторые иные параметры.

В начале 80-х в ИТПМ СО РАН была предложена и в последующем получила развитие математическая модель механики реагирующих гетерогенных сред для описания гетерогенной детонации. Для ее верификации использовались, в том числе и данные по зависимости скорости детонационной волны (ДВ) от концентрации частиц. Для численного решения уравнений математической модели была разработана соответствующая математическая технология, основанная на схемах TVD и Мартина — Дели. Все данные расчетов подтверждают высокую степень точности предложенных численных алгоритмов для решения конкретных прикладных задач теории гетерогенной детонации. Это было в русле проблем, поставленных Н. Н. Яненко в развитие методов механики гетерогенных сред.

Одномерные стационарные/нестационарные детонационные волны, устойчивость

Для построения теории гетерогенной детонации взвеси алюминия в кислороде была определена структура ДВ. На ее основе дана классификация типов гетерогенной детонации: недосжатая, пересжатая, Чепмена — Жуге. Это позволило в зависимости от относительного времени релаксации неравновесных про-

цессов в смеси указать области, где будет наблюдаться слабая, сильная детонация и детонация Чепмена — Жуге. Полученные стационарные решения пересжатой детонации оказались устойчивыми при условии поддержки дозвуковым поршнем. Были получены условия существования ρ -слоя, T -изгиба и т. д. Изучены возможные предельные переходы при стремлении времени релаксации к нулю. Устойчивость решений относительно одномерных возмущений установлена расчетным методом. Исследования устойчивости относительно сопряжения с волной разрежения показали устойчивость режимов Чепмена — Жуге и слабой детонации. Режим слабой недосжатой детонации со сверхзвуковым конечным состоянием является также самоподдерживающимся.

Важным элементом предлагаемой теории является проблема инициирования. Были найдены сценарии жесткого и мягкого инициирования гетерогенной детонации при разрушении камеры высокого давления. Выявлено влияние параметров релаксации различной природы частиц на типы формирующихся течений и определены критерии инициирования.

Двумерные нестационарные детонационные течения

Следующий шаг в построении теории гетерогенной детонации состоял в разработке математической технологии для изучения формирования детонационноподобных комплексов детонационная волна / ударная волна и ячеистых структур в каналах, частично заполненных газозвесью при ударно-волновом инициировании. Были решены проблемы инициирования гетерогенной детонации в слое газозвеси частиц алюминия и кислорода (слоевая детонация) под действием поддерживаемой и взрывной УВ.

Среди полученных результатов можно отметить, что при достаточных ширине облака и энергии инициирования формируется детонационная структура, смыкающаяся с УВ вне облака, и комбинированная ударная/детонационная волна распространяется вдоль канала. Течение является нестационарным, периодические флуктуации здесь выражены сильнее, а сформированные структуры напоминают ячеистые. Картина некоторым образом подобна течению типа ячеистой детонации при распространении ДВ с одной попереч-

ной волной в канале. Однако волновая картина здесь более сложная и нерегулярная.

Формирование ячеистой детонации в газозвеси частиц алюминия в плоском канале

Известно, что одномерная модель детонации Зельдовича — Неймана — Дёринга не описывает известных особенностей распространения реальных ДВ, таких как многофронтная или ячеистая детонация. Исследование гетерогенной детонации в этом случае по сравнению с гомогенным аналогом осложняется наличием релаксационных процессов выравнивания скоростей и температур фаз. Одним из важных вопросов ячеистой детонации является установление связи между размером ячейки и характеристиками детонации. На основе проведенных численных экспериментов была предложена степенная зависимость поперечного размера детонационной ячейки от диаметра частиц $\lambda = \lambda_0(d/d_0)^\theta$, где $d_0 = 10$ мкм, $\lambda_0 = 27$ см, $\theta = 1.6$. Полученные результаты согласуются с данными экспериментов, в которых при инициировании детонации во взвеси сферических частиц алюминия размером 3.5 мкм в кислороде наблюдалось формирование детонационных ячеек размером 5 ÷ 10 см, что близко к нашим результатам. Определена связь размера ячейки и характерных масштабов детонационной структуры.

Переход детонации из узкой части канала в широкую. Подавление детонации вбросом инертных частиц

В технических приложениях часто бывает важно определить тип детонационного течения при движении в каналах технических устройств. Оказалось, что так же, как и в теории гомогенной детонации, на разрыве сечения канала при переходе наблюдаются критические, сверхкритические и непрерывные переходы детонации. Однако, в отличие от газовой детонации, соответствующие критерии существования перехода детонации Чепмена — Жуге и ячеистой зависят не только от отношения ширины узкой и широкой частей канала, но и от размера частиц газозвесей. Проведен цикл работ по проблеме ослабления/подавления детонации путем создания пылевых завес.

ДИАГНОСТИКА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ДВУХФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Для постановки экспериментов, направленных на изучение микроструктуры двухфазных течений в релаксационной зоне за фронтом лидирующей УВ или ДВ при температуре и давлении, характерных для пылегазовых взрывов ($T = 1000 \div 2500$ К, $p = 1 \div 6$ МПа), была создана специальная ударная труба ($M = 1.5 \div 4.5$), оснащенная комплексом быстродействующей оптической диагностической аппаратуры на основе лазерного стробоскопа. Высокое пространственно-временное разрешение диагностической аппаратуры позволило поставить эксперименты, направленные на исследование быстропротекающих физических процессов, связанных с ускорением, деформацией, дроблением, испарением, воспламенением и горением капель и твердых частиц.

Смесеобразование за фронтом скользящей вдоль пленки жидкости и слоя пыли ударной волны

Методом многокадровой теневой лазерной визуализации исследован процесс смесеобразования за проходящими УВ, скользящими над поверхностью жидкой пленки. Получены данные о динамике роста толщины газожидкостной смеси в зависимости от физических свойств жидкости, интенсивности УВ и начальной толщины пленки. Исследован процесс образования двухфазной смеси за проходящими УВ, скользящими над слоями пылевых отложений с частицами размером $50 \div 500$ мкм и плотностью $1.2 \div 8.6$ г/см³. Получены данные о динамике подъема частиц, которые были использованы для калибровки физико-математических моделей и выявления механизмов подъема частиц.

Воспламенение и горение частиц в двухфазном потоке за ударными волнами. Воспламенение металлической и угольной пыли

Методом высокоскоростной киносъемки и фоторазвертки свечения пламени исследованы процессы воспламенения порошков Mg, Al и угольной пыли за отраженными и ударными волнами ($T = 1000 \div 2000$ К). Обнаружено поджигающее воздействие мелких частиц. Определены критические значения температуры воспламенения и получены точные и достоверные данные по задержке воспламенения по-

рошков металлов различной дисперсности. Построены корреляционные выражения, описывающие задержку воспламенения угольной пыли в зависимости от содержания летучих, температуры и состава окислительной среды. Данные по задержке воспламенения показали, что воспламенение в проходящей волне происходит в $5 \div 10$ раз быстрее, чем в отраженной. Экспериментально реализована возможность разогрева газа при торможении сверхзвукового потока за фронтом проходящей УВ в облаке твердой дисперсной фазы.

Динамика ускорения, разрушения и воспламенения капель

Методами теневой лазерной визуализации и фоторазвертки свечения пламени исследована динамика ускорения, разрушения и воспламенения капель горючих жидкостей в УВ при $M = 2 \div 4$. Впервые в идентичных условиях получены картины разрушения капель сильновязких (≈ 1 Нс/м²) и маловязких ($\approx 10^{-3}$ Нс/м²) жидкостей и уточнен механизм реализации срывного типа разрушения капли. Получены точные и достоверные данные по задержке воспламенения жидких углеводородных топлив за отраженными и проходящими УВ в диапазоне температуры среды $1000 \div 2000$ К, найдены аппроксимирующие зависимости.

В заключение заметим, что мы лишь кратко описали результаты некоторых исследований, проведенных в ИТПМ СО РАН. Заинтересованный читатель может почерпнуть дополнительную информацию из монографий и обзоров [1–27], впрочем, и этот список является далеко не полным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сергей Алексеевич Христианович. Выдающийся механик XX века / отв. ред. В. М. Фомин, А. М. Харитонов. — Новосибирск: Изд-во «Гео», 2008.
2. Баев В. К., Головичев В. И., Ясаков В. А. Двумерные турбулентные течения реагирующих газов. — Новосибирск: Наука, 1976.
3. Яненко Н. Н., Солоухин Р. И., Папырин А. Н., Фомин В. М. Сверхзвуковые двухфазные течения в условиях скоростной неравновесности частиц. — Новосибирск: Наука, 1980.
4. Баев В. К., Головичев В. И., Третьяков П. К. и др. Горение в сверхзвуковом потоке. — Новосибирск: Наука, 1984.

5. Рычков А. Д. Математическое моделирование газодинамических процессов в каналах и соплах. — Новосибирск: Наука, 1988.
6. Яненко Н. Н., Фомин В. М., Федоров А. В., Киселев С. П., Медведев А. Е., Рувев Г. А., Папырин А. Н., Бойко В. М. Структура ударных, детонационных волн и комбинированных разрывов в смесях газа и частиц // Механика реагирующих сред и ее приложения / отв. ред. д.ф.-м.н. Ю. А. Березин, А. М. Гришин. — Новосибирск: Наука, 1989. — С. 133–143.
7. Бойко В. М. Лазерная диагностика микропроцессов, возникающих при взаимодействии ударных волн с жидкими и твердыми частицами: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.02.05. — Новосибирск, 1995.
8. Фомин В. М., Федоров А. В., Бойко В. М., Рычков А. Д., Губайдуллин А. А. Волновая динамика реагирующих и нереагирующих газовзвесей // Теплофизика и аэромеханика. — 1997. — Т. 4, № 2. — С. 129–157.
9. Ковалев О. Б. Многофазные модели воспламенения и горения твердых гетерогенных систем: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.02.05. — Новосибирск, 1998.
10. Баев В. К. Исследования по горению // Институт теоретической и прикладной механики. Годы, люди, события / отв. ред. А. М. Харитонов. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. — С. 166–173.
11. Масленников В. М. Из воспоминаний о Сибирском отделении Академии наук // Там же. — С. 110–113.
12. Шемякин Е. И. Извлечения из памяти // Там же. — С. 97–99.
13. Кутушев А. Г. Математическое моделирование волновых процессов в аэродисперсных и порошковых средах. — СПб.: Недра, 2003.
14. Федоров А. В. Смесеобразование при распространении волновых процессов в газовзвесях (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2004. — Т. 40, № 1. — С. 21–37.
15. Гетерогенная детонация (глава 12) / А. В. Федоров, В. М. Фомин, Т. А. Хмель // Законы горения / ред. Ю. В. Полежаев. — М.: Энергомаш, 2006. — С. 276–302.
16. Федоров А. В., Фомин В. М., Гостеев Ю. А. Динамика и воспламенение газовзвесей. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006.
17. Федоров А. В., Фомин В. М., Хмель Т. А. Теоретическое и численное исследование процессов детонации в газовзвесах частиц алюминия // Физика горения и взрыва. — 2006. — Т. 42, № 3. — С. 126–136.
18. Ермолин Н. Е. Численное моделирование химических процессов в пламенах газозвешных и конденсированных систем: дис. ... д-ра физ.-мат. наук / ИТПМ СО РАН. — Новосибирск, 2007.
19. Губайдуллин А. А. Волны в газожидкостных системах. — Тюмень: Изд-во Тюм. гос. ун-та, 2008.
20. Федоров А. В., Фомин П. А., Фомин В. М., Тропин Д. А., Чен Дж.-Р. Физико-математическое моделирование подавления детонации облаками мелких частиц. — Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2011.
21. Поплавский С. В. Динамика частиц и капель в ударных волнах: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.02.05. — Новосибирск, 2011.
22. Федоров А. В., Фомин В. М., Хмель Т. А. Гетерогенная детонация газовзвесей. — Новосибирск: НГТУ, 2012.
23. Федоров А. В. О воспламенении и горении дисперсных и нанодисперсных газовзвесей в динамических условиях // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 3. — С. 53–61.
24. Fedorov A. V., Fomin P. A., Fomin V. M., Tropin D. A. Mathematical analysis of detonation suppression by inert particles. — Kaohsiung, Taiwan: Kao Tech Publishing, 2012. — ISBN 978-906-88423-04.
25. Звегенцев В. И. Газодинамические установки кратковременного действия. — Новосибирск: Параллель, 2014. — Часть 1: Установки для научных исследований.
26. Королев А. С., Бошенятов Б. В., Друкер И. Г., Затолака В. В. Импульсные трубы в аэродинамических исследованиях. — Новосибирск: Наука, 1978.
27. Алхимов А. П., Клинков С. В., Косарев В. Ф., Фомин В. М. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика. — М.: Физматлит, 2010.

Поступила в редакцию 6/Х 2014 г.