

УДК 532.529+541.126

## О ВОСПЛАМЕНЕНИИ И ГОРЕНИИ ДИСПЕРСНЫХ И НАНОДИСПЕРСНЫХ ГАЗОВЗВЕСЕЙ В ДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

А. В. Фёдоров

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

Дан краткий обзор полученных в ИТПМ СО РАН результатов математического моделирования распространения волн гетерогенной детонации в смеси мелких частиц алюминия в кислороде, воспламенения мелких частиц металлов в отраженных и проходящих ударных волнах, высокотемпературных потоках газов. Рассматривались одномерные стационарные и одно- и двумерные нестационарные течения реагирующей смеси. Определены течения в виде волн недосжатой, пересжатой детонации и детонации Чепмена — Жуге. Показаны устойчивость течения Чепмена — Жуге и недосжатой детонации относительно взаимодействия с волнами разрежения. Определены режимы сильного и слабого инициирования, для которых получено неплохое соответствие расчетных и экспериментальных значений энергии инициирования. В рамках двумерных нестационарных детонационных течений найдены слоевая детонация и ячеистая детонация для моно- и полидисперсных смесей. Разработаны оригинальные численные коды для решения нелинейных краевых задач воспламенения отдельных частиц. Внимание обращалось на точность передачи интегральных параметров (времени горения) некоторых экспериментальных данных в зависимости от температуры окружающей среды и др. Описано решение однофазной задачи Стефана о плавлении наноразмерной частицы.

Ключевые слова: газовзвесь, двумерная нестационарная гетерогенная детонация, слоевая и ячеистая детонация, воспламенение, горение, плавление микро- и наночастиц, численное моделирование.

### ВВЕДЕНИЕ

К. И. Щёлкин известен во всем мире своими классическими работами в области детонации газовых систем, выполненными в сороковых годах прошлого столетия. Известно, что теория и практика детонации реагирующих сред непрерывно расширяются. В годы, следовавшие за открытиями в области детонации гомогенных смесей газов, появились новые приложения этого раздела науки к гетерогенным смесям, таким как смеси газа и реагирующих частиц. Ниже дан краткий обзор полученных в ИТПМ СО РАН результатов математического моделирования распространения детонационноподобных режимов сгорания мелких частиц алюминия в кислороде в рамках механики двухскоростных двухтемпературных реагирующих гетерогенных сред, воспламенения мелких частиц металлов в высокотемпературных потоках газов. Рассмотрены одно- и двумерные нестационарные течения. Математическое моделирование в рамках двумерных нестационар-

ных детонационных течений позволило обнаружить квазистационарные детонационные комплексы, возникающие при инициировании пристенных слоев газовзвесей, ячеистую детонацию для моно- и полидисперсных смесей. Получена связь между характерным размером ячейки и радиусом частицы, показана возможность вырождения ячеистой структуры при наличии распределения частиц по размерам. Оказалось, что присутствие небольшого количества частиц мелкой фракции в полидисперсной смеси приводит к снижению энергии инициирования. Поведение одиночных металлических частиц (нано- и микро размеров) в высокотемпературной газовой среде рассмотрено на основе нестационарных уравнений теплопроводности с учетом тепловых источников от химических реакций. Для решения нелинейных краевых задач разработаны оригинальные численные коды, а также использованы некоторые известные из литературы. Особое внимание уделялось точности передачи интегральных параметров (времени воспламенения, горения) в зависимости от температуры окружающей сре-

ды и др. Решена однофазная задача Стефана для описания плавления наноразмерной частицы, предшествующего ее горению.

### РАСПРОСТРАНЕНИЕ ДЕТОНАЦИОННОПОДОБНЫХ РЕЖИМОВ СГОРАНИЯ МЕЛКИХ РЕАГИРУЮЩИХ ЧАСТИЦ

В науке и технике сталкиваются с возникновением неконтролируемых взрывов реагирующих аэрозвесей. Одна из причин этого явления — неустойчивые отложения реагирующих пылей на различных поверхностях. Под действием некоторого возмущения частицы пыли поднимаются в воздух. В результате может образоваться взрывоопасная смесь газа и твердых частиц. Это первая фаза (смещение) описываемого далее явления. Если за фронтом ударной волны, лидирующей в поднятой газозвеси, реализуются условия воспламенения и горения твердой фазы, возможен переход возникающей дефлаграционной волны в детонационную (фаза дефлаграционно-детонационного перехода). В результате возникает гетерогенная детонация — самоподдерживающееся распространение сверхзвуковой волны горения в реагирующей газозвеси. Физико-математическая модель данного явления, развитая нами в рамках механики гетерогенных сред, позволила решить некоторые задачи одномерных и двумерных стационарных и нестационарных течений смеси при гетерогенной детонации частиц алюминия в кислороде.

#### Экспериментальные основы и математическая модель гетерогенной детонации

В середине прошлого столетия в США, СССР, Франции, Китае проводились экспериментальные исследования распространения детонационноподобных режимов горения в смесях кислорода и воздуха, а также в смесях реагирующих газов (водород — кислород) с алюминиевыми частицами. Установлено, что при некоторых условиях инициирования в гетерогенных смесях развивается самоподдерживающийся режим сверхзвукового горения. Определены зависимости скорости детонации от содержания частиц в смеси, критические энергии инициирования и время установления детонационного режима. В начале 1980-х годов в

ИТПМ СО АН СССР была предложена математическая модель механики реагирующих гетерогенных сред, в которой учитывались задержка воспламенения, описываемая некоторым феноменологическим критерием (температура воспламенения), и приведенная кинетика горения частиц [1–3]. Для ее верификации использовались в том числе и данные по зависимости скорости детонационной волны от концентрации частиц; результаты построенной модели неплохо описывают экспериментальную зависимость. Позднее для моделирования детонации частиц алюминия в кислороде мы использовали упрощенную форму данной математической модели [3], основанную на представлениях двухскоростного двухтемпературного континуума механики гетерогенных сред, — будем называть ее далее системой А. После достижения частицами температуры срыва теплового равновесия начинается процесс горения, описываемый уравнением приведенной кинетики (см. также [4–8]).

Отметим, что в литературе известны и другие математические модели для описания детонации смесей мелких частиц и газов. Например, в России это модели школы Р. И. Нигматулина, школы В. А. Левина, школы В. П. Коробейникова и др.

#### Численные методы для решения задач гетерогенной детонации

Для численного решения начально-краевых задач детонации используется явная схема второго порядка типа TVD для газа [9]. Для расчета динамики и теплообмена частиц применяется или схема Мак-Кормака, или схема с разностями против потока Джентри — Мартина — Дэйли. Одномерные нестационарные расчеты и свойства указанных схем приведены в [10, 11]. Расчеты двумерных течений по схемам TVD — Мак-Кормака и TVD — Джентри показали близкие результаты, при этом вторая схема оказалась намного экономичнее.

Разработанные численные методы были протестированы на примере задачи о распространении плоской волны стационарной детонации в газозвеси частиц алюминия. Расчеты двумерных задач тестировались на последовательности вложенных сеток. Все данные расчетов подтверждают высокую степень точности предложенных численных алгоритмов.

### Стационарные детонационные волны, классификация типов

Для решения задачи о распространении бегущей волны гетерогенной детонации (ДВ) используется предложенная выше система уравнений А в одномерном приближении. При этом решение краевой задачи для ДВ ставится как задача на собственное значение — скорость ДВ. Минимально возможное значение этой величины соответствует режиму Чепмена — Жуге (ЧЖ):  $u_0 = u_{CJ}$ . При  $u_0 > u_{CJ}$  возможны два конечных состояния, отвечающих пересжато́му либо недосжато́му режиму детонации. Доказательства даны в работах [3, 10, 11]. Там же построены карты детонационных течений в соответствующих фазовых пространствах.

Поскольку для широкого диапазона размеров частиц границы изменения параметров скоростной и тепловой релаксации размыты, было проведено исследование детонационных режимов с переменными значениями этих параметров. Оказалось, что качественная картина течения остается неизменной относительно данных аппроксимаций времен релаксации. На основе анализа численных расчетов нами получены (см. цитированные работы) условия существования стационарных режимов с различным типом поведения  $\rho$ -слоев и т. п.

### Устойчивость стационарных детонационных волн

Описанные выше стационарные решения различных типов (пересжатые, недосжатые) реализуются при задании соответствующих граничных условий на бесконечности. Физически это наблюдается при поддержке данных состояний поршнем, скорость которого равна скорости смеси в конечном состоянии. Устойчивость решений относительно одномерных возмущений установлена в [10]. Показано, что все детонационные режимы, включая недосжатый с межзвуковым конечным состоянием, являются устойчивыми относительно одномерных конечных возмущений, если при этом не возмущается конечное состояние.

Исследование устойчивости всех мод детонации относительно сопряжения с волной разрежения показало, что в режиме ЧЖ и недосжато́м режиме детонация устойчива и самоподдерживается. Пересжатый режим в области существования режима ЧЖ как в односкоростной, так и в двухскоростной постановке транс-

формируется в волну ЧЖ. Вне области существования режимов ЧЖ самоподдерживающимися являются недосжатые стационарные режимы со сверхзвуковым конечным состоянием. Были исследованы и иные режимы взаимодействия ДВ и волны разрежения [4, 12].

### Иницирование детонации в каналах [4–6]

Начально-краевую задачу о распаде разрыва для системы уравнений А можно трактовать как задачу об иницировании гетерогенной детонации. При этом были численно найдены, например, такие сценарии иницирования, как жесткое и мягкое иницирование. Так, при больших значениях параметров смеси в камере высокого давления частицы достигают температуру воспламенения непосредственно за фронтом головного ударного скачка, сформированного в результате распада разрыва. В этом случае сразу после разрушения диафрагмы происходит усиление ударной волны (УВ), затем ее переход в детонационную. Данный сценарий назвали жестким иницированием. Здесь протяженность зоны формирования составляет порядка 1 м, что согласуется с экспериментальными данными [13] и др. Аналогично рассмотрено и мягкое иницирование при более низких значениях параметров газа в камере высокого давления. Получен критерий иницирования, изучено иницирование ударными волнами постоянной и переменной амплитуды.

### Иницирование слоевой детонации в газозвеси частиц алюминия и кислорода. Детонация в полидисперсных смесях

Возможный сценарий установления детонационного режима в плоском канале, в котором находится облако/слой газозвеси, содержит все фазы установления гетерогенной детонации, описанные выше. В результате взаимодействия УВ со слоем происходят подъем частиц пыли, образование газозвеси, воспламенение, горение частиц и возникновение гетерогенной детонации. Оказалось, что УВ с числом Маха  $M_0 = 5$  имеет все условия для воспламенения частиц, их горения и формирования пересжатой детонационной волны. Далее УВ ослабляется и устанавливается режим стационарной детонации. Течение за фронтом ДВ, сопряженной с УВ, движущейся в чистом газе, не является стационарным. В то же время в среднем

по времени скорость распространения фронта постоянна. Была рассмотрена и проблема инициирования детонации в слое под воздействием взрывной УВ. Здесь в газозвеси прослеживается прохождение поперечной волны, которая, отражаясь от верхней и нижней стенок канала, способствует образованию ячейстоподобной структуры течения. Картина некоторым образом подобна ячейстой детонации в канале (в данном случае с одной поперечной волной). Однако поперечная волна распространяется здесь как по смеси, так и по газу, и поддерживает УВ вне облака. Средняя по времени скорость детонации соответствует скорости Чепмена — Жуге.

Проведено изучение формирования ячейстой детонации в газозвеси частиц алюминия, заполняющей плоский канал. Получена калибровочная кривая — зависимость размера ячейки от диаметра частиц для соответствующей ширины канала в виде функции со степенью 1.6 [7, 8, 14, 15].

Значительный интерес представляет численное моделирование ячейстой детонации в газозвеси частиц алюминия. Такие структуры обнаружены в экспериментах [16, 17]. Процесс формирования ячейстой структуры нами моделировался как результат развития возмущений, возникающих при ударно-волновом иницировании. В качестве иницирующего воздействия рассмотрена плоская взрывная УВ, распространяющаяся вдоль канала в чистом (без частиц) кислороде. Полученные ячейстые структуры согласуются с экспериментальными данными [16], где при иницировании детонации во взвеси сферических частиц алюминия размером 3.5 мкм в кислороде наблюдалось формирование детонационных ячеек размером  $5 \div 10$  см.

Остановимся на некоторых результатах исследования гетерогенной детонации в полидисперсной смеси [18], таких как анализ стационарных плоских волн детонации в бидисперсных взвесах, отличие стационарных структур Зельдовича — Неймана — Дёринга неидеальной детонации бидисперсных взвесей от структур монодисперсных взвесей и влияние состава на структуры, распространение плоской волны в бидисперсной взвеси в сопряжении с волной разрежения. Так, расчетным путем было найдено резкое снижение порога иницирования; оказалось, что 5 % мелких частиц в смеси обеспечивают 30%-е снижение энергии иници-

ирования.

Установлены интересные свойства вырождения ячейстой детонации: ослабление амплитуды пульсаций, спрямление фронта, уменьшение пиковых давлений при столкновении тройных точек, происходящие при последовательном изменении параметра насыщенности от предельных значений. Описаны случаи полного вырождения ячейстой детонации, что выражается в устойчивом распространении плоских волн при изменении соотношения частиц различных фракций. Оказалось, что данные экспериментов [17] и др. по детонации аэрозвесей порошков алюминия свидетельствуют о снижении пульсаций в структуре волны ячейстой детонации при переходе от монодисперсного порошка к полидисперсному. Этот эффект качественно воспроизводится в наших расчетах детонации в трехфракционной взвеси. Выяснилось, что при описании некоторых свойств детонирующей газозвеси достаточно ограничиться двух-, трехфракционными смесями; увеличение числа фракций не изменяло этих свойств. Имеет место своеобразный предельный переход по числу фракций. Как было отмечено выше, воспламенение мелких частиц играет одну из ключевых ролей в процессе гетерогенной детонации. Поэтому представляет интерес исследование собственно этого явления методами физико-математического моделирования, чему посвящен следующий параграф.

#### ВОСПЛАМЕНЕНИЕ И ГОРЕНИЕ ОДИНОЧНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ. СОПРЯЖЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ ОБРАЗЦОВ МЕТАЛЛОВ

Для описания тепловой истории частицы магния в газовой среде предложена распределенная математическая модель, учитывающая гетерогенную химическую реакцию и область теплового влияния частицы на газ [19, 20]. Считали, что температуры фаз различны, а воздействие осуществляется поддержанием некоторой высокой температуры на границе газовой области. На контактной границе поставлены условия сопряжения потоков тепла, учитывающие гетерогенную химическую реакцию низкотемпературного окисления. Показана разрешимость задачи в стационарном случае, что позволило расширить классификацию регулярных режимов, режимов погасания и воспламе-

нения частицы также и на данную контактную математическую модель воспламенения. Разработана математическая технология решения рассмотренного класса краевых задач воспламенения магниевых частиц, и на ее основе верифицирована математическая модель по зависимостям времени задержки воспламенения от числа Нуссельта. Выявлен предельный размер газового слоя вблизи частицы, определяющего режим воспламенения. Показана устойчивость некоторых режимов нагрева относительно конечных и инфинитезимальных возмущений, возможность управления процессом воспламенения с помощью высокочастотного теплового воздействия на неустойчивые состояния системы частица + газ [20]. В последующем эти результаты были обобщены для описания тепловой истории частицы магния в среде окислителя в двумерной нестационарной постановке механики реагирующих сред [21]. Разработана и протестирована математическая технология решения рассмотренного класса двумерных краевых задач воспламенения частиц магния. Выявлено существенное влияние неоднородности поля температур окружающей среды на время задержки воспламенения частицы. В данных постановках принималась во внимание лишь стадия воспламенения.

В дальнейшем нами была разработана распределенная сопряженная двумерная математическая модель механики гетерогенных сред, описывающая как воспламенение, так и горение частиц магния с учетом гетерогенной химической реакции и области теплового влияния частицы на газ [22]. Решены задачи воспламенения и горения частиц под действием равномерного и неравномерного тепловых полей в прямоугольном микроканале. На основе численной реализации новой двумерной математической модели воспламенения и горения мелких частиц металла в микрообластях установлено, что для частицы, находящейся в условиях неравномерного нагрева, понятие критической температуры воспламенения является обоснованным; в достаточно длинных микроканалах размер области теплового влияния двух частиц в совокупности оценивается как 4–5 их одинаковых радиусов; имеет место закон подобия тепловой истории частиц, расположенных в цилиндрическом и прямоугольном каналах, с определенным коэффициентом подобия областей для различных физико-химических параметров; данная математическая модель каче-

ственно описывает явление концентрационно-го предела и дает возможность высказать суждение о его механизме. В указанных постановках не принималось во внимание выгорание частицы. Поэтому нами была предложена сопряженная математическая модель воспламенения и горения частицы магния с учетом окружающей ее газовой области в рамках однофазного подхода проблемы Стефана. Для ее реализации разработана соответствующая математическая технология [23]. Некоторые результаты верификации модели приведены на рис. 1, 2: зависимость времени горения частицы в воздухе от диаметра и зависимость времени воспламенения частицы в кислороде от его концентрации при нормальном давлении окружающей среды (в сравнении с экспериментальными данными из [24, 25]). Кроме того, оказалось, что как на стадии воспламенения, так и на стадии горения, область влияния частицы на окружающую ее среду оценивается четырьмя ее радиусами.

#### Плавление наночастиц алюминия

В промышленности вызывают интерес проблемы воспламенения и горения не только микронных, но и наноразмерных частиц реагирующих металлов. Для физико-математического описания данных процессов важно знать физическое состояние наночастицы перед воспламенением/горением. Поэтому необходимо построение математической модели плавления, испарения и т. п. сверхмелких частиц [26, 27]. Важным параметром рассмат-

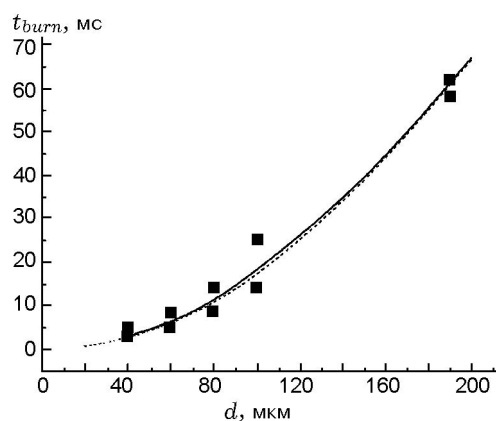


Рис. 1. Зависимость времени горения частицы от ее диаметра (точки — данные эксперимента [24, 25])

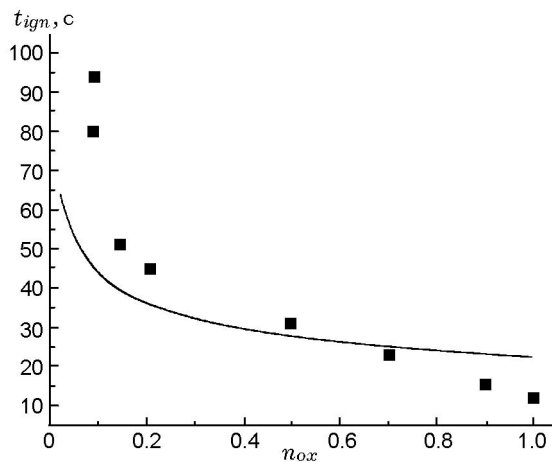


Рис. 2. Зависимость времени задержки воспламенения частицы от содержания кислорода в окружающей среде (точки — данные эксперимента [24, 25])

риваемого нанообъекта является температура плавления. Именно изменение температуры плавления металлов в зависимости от размера частиц, по-видимому, стало одним из первых эффектов, привлечших внимание многочисленных исследователей. Известно [28–30], что при уменьшении размеров наночастиц изменяются не только их механические свойства, но и термодинамические характеристики. В частности, температура плавления становится ниже, чем у образцов обычного размера. Впрочем, имеются указания, что возможен и обратный эффект. При этом кристаллическая структура твердой фазы исчезает и заменяется неупорядоченным состоянием жидкости. Значительное уменьшение температуры плавления с размером частиц металла может отражаться на их активности и селективности. С позиций термодинамики переход из твердого состояния в жидкое с увеличением температуры начинается с появления на поверхности наночастицы «бесконечно» тонкого жидкого слоя. При этом ядро частицы еще остается твердым. Подобное плавление обусловлено поверхностным натяжением, отражающим взаимодействие жидкой и твердой фаз и изменяющим энергию системы. Возможен и гетерогенный механизм плавления, когда в твердом ядре возникают зародыши жидкой фазы, которые со временем разрастаются, так что жидкая фаза появляется в виде гомогенного образования.

В экспериментальных работах [28–30] исследовались термодинамические свойства алю-

миниевых наночастиц. Авторы установили, как уменьшается температура плавления с уменьшением размеров частицы. Например, для частицы радиусом 4 нм уменьшение составило 140 °С по сравнению с температурой плавления образца алюминия обычных (микронных) размеров. Экспериментальные данные были описаны по модели «жидкой оболочки» [29], которая основана на положениях классической термодинамики. Аналогичная зависимость для наночастиц золота получена в [30] путем измерения температуры плавления частиц с помощью сканирующего электронно-дифракционного устройства. Заметим, что у наночастиц золота наблюдалось одно из самых больших падений температуры плавления (более чем на 500 °С). Анализ различных формул, аппроксимирующих эти зависимости, позволяет утверждать, что некоторые имеющиеся в литературе данные об изменении температуры плавления в зависимости от радиуса наночастиц могут быть в той или иной степени точно описаны с помощью гиперболического закона. Расчеты методом молекулярной динамики показали существенное отличие описания данной зависимостью от результатов экспериментов. Сведения о динамике собственно процесса плавления немногочисленны [31]. Поэтому представляло интерес рассмотреть плавление наночастиц на основе феноменологической модели, использующей подходящие аппроксимации экспериментальных данных по зависимости температуры плавления от радиуса наночастиц. Подобное рассмотрение проведено в [31] для наночастицы золота в рамках двухфазного подхода задачи Стефана с использованием гиперболического закона плавления. Нами предложена физико-математическая модель для описания плавления наноразмерных частиц алюминия и золота в рамках однофазной задачи Стефана с учетом экспериментально обнаруженного факта (см. выше) уменьшения температуры плавления с уменьшением радиуса частиц. Определены зависимости времени плавления наночастиц алюминия и золота от радиуса и температуры окружающей среды. Установлено, что при эквивалентных отношениях температуры окружающей среды к температуре плавления отношение времени плавления частиц алюминия к времени плавления частиц золота остается примерно постоянным и равным 4.

### Точечная модель горения наночастиц алюминия вблизи торца ударной трубы в смеси кислорода и азота

Рассмотрим совокупность наночастиц алюминия в газовой смеси кислорода и азота, расположенную вблизи торца ударной трубы. Для описания тепловой истории частиц введено понятие двух температур (газа и частиц), а в некоторых случаях плодотворным является моделирование горения частиц с помощью эмпирического закона выгорания частиц. Тем самым приходим к точечной модели [32] для описания горения наночастицы алюминия.

Как обычно, при решении проблемы воспламенения и горения частицы возникают две задачи: прямая — определение тепловой истории частицы; обратная — определение кинетических параметров выгорания, фигурирующих в правой части уравнения кинетики горения, с последующим определением тепловой истории. Для решения, вообще говоря, некорректной обратной задачи применим эмпирический подход, когда для поиска неизвестных энергии активации и других входящих параметров системы решается последовательность прямых задач Коши, при этом минимизируется функционал невязки по времени горения. В результате численных расчетов обратной задачи эти величины были определены, и с их использованием получены следующие данные. Так, было показано, что точечная математическая модель горения наноразмерных частиц алюминия (80 нм) удовлетворительно описывает время горения в диапазоне начальных давлений  $8 \div 32$  атм и температур  $1200 \div 2200$  К при содержании кислорода в смеси  $10 \div 50$  %. Расчетные данные показали неплохое соответствие результатам [33, 34] по времени горения в рассмотренном диапазоне параметров.

К вопросам гетерогенной детонации относятся и проблемы распространения и подавления детонации в реагирующих газовых смесях в присутствии инертных мелких частиц.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДАВЛЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ ОБЛАКАМИ ИНЕРТНЫХ ЧАСТИЦ

Моделирование процесса ослабления и подавления ДВ в реагирующих смесях представляет значительный научный и практический интерес в связи с проблемой взрыво- и пожаробезопасности промышленных производств. Одним из способов подавления неконтролируе-

мой детонации является метод гашения с добавлением инертных частиц во взрывоопасную смесь. Оказалось, что это эффективный способ контролирования и модификации процессов горения и детонации в газовых системах, который может привести к различным режимам горения и детонации смеси, а также к полному гашению ДВ.

Для описания данного процесса в смеси водорода, кислорода и частиц песка предложена модель неравновесной газовой динамики, основанная на детальной кинетике горения компонентов с учетом наличия дискретного компонента. Численное решение данной системы уравнений позволило определить картину возникающего детонационного течения и сценарий его подавления, определить влияние концентрации и диаметра частиц на подавление детонации. Установлено, что увеличение концентрации частиц, так же как и уменьшение их диаметра, при сохранении их доли в объеме приводит к уменьшению скорости ДВ (рис. 3). Проведено сопоставление этих зависимостей для случаев неподвижных и движущихся частиц. Расчеты с неподвижными частицами выполнены нами в работах [35, 36]. Как видно из рис. 3, в областях малых объемных концентраций частиц эти зависимости идут близко друг от друга. Различия начинаются при приближении объемной концентрации к критическому значению. Более того, чем меньше диаметр частиц, тем сильнее отличаются концентрационные пределы, полученные по этим

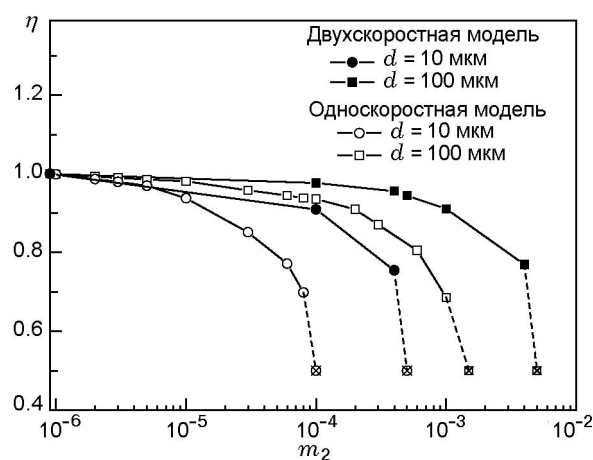


Рис. 3. Зависимость дефицита скорости детонации от объемной концентрации частиц. Сравнение данных двухскоростной и односкоростной моделей

моделям. Для 100-микронных частиц пределы отличаются в 2.5 раза, для 10-микронных — в 5 раз.

Найдены условия подавления детонации, т. е. определена критическая объемная концентрация частиц (на рис. 3 эти пределы представлены перекрестными точками), при которой происходит распад ДВ на замороженную УВ и волну воспламенения и горения. Рассчитана минимальная длина облака/фильтра частиц, при которой происходит гашение ДВ. Исследовано влияние изменения объемной концентрации частиц в облаке на эффективность подавления детонации. Оказалось, что определяющим параметром является не столько масса частиц и градиент их объемной концентрации, сколько длина облака, на которой происходит гашение волны воспламенения-горения, образующейся при распаде ДВ. Было показано, что для различных конфигураций распределения объемной концентрации частиц в облаке это длина примерно одинакова.

Автор выражает благодарность за сотрудничество В. М. Фомину, И. А. Бедареву, Ю. В. Кратовой, Д. А. Тропину, Т. А. Хмель, А. В. Шульгину.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Медведев А. Е., Федоров А. В., Фомин В. М. Описание воспламенения и горения смесей газа и твердых частиц методами механики сплошной среды // Физика горения и взрыва. — 1984. — Т. 20, № 2. — С. 3–9.
- Еремеева Т. А., Медведев А. Е., Федоров А. В., Фомин В. М. К теории идеальной и неидеальной детонации аэрозвесей. — Новосибирск, 1986. — (Препр./АН СССР, Сиб. отд-ние ИТПМ; № 37-86).
- Федоров А. В. Структура гетерогенной детонации частиц алюминия, диспергированных в кислороде // Физика горения и взрыва. — 1992. — Т. 28, № 3. — С. 72–83.
- Федоров А. В., Хмель Т. А. Определение самоподдерживающихся режимов неидеальной детонации на модели аэрозвесей частиц алюминия // Физика горения и взрыва. — 1998. — Т. 34, № 5. — С. 95–102.
- Федоров А. В., Тетенов Е. В. Иницирование гетерогенной детонации частиц алюминия, диспергированных в кислороде // Физика горения и взрыва. — 1992. — Т. 28, № 3. — С. 83–89.
- Федоров А. В., Хмель Т. А. Численное моделирование ударно-волнового иницирования гетерогенной детонации аэрозвесей частиц алюминия // Физика горения и взрыва. — 1999. — Т. 35, № 3. — С. 81–88.
- Федоров А. В., Хмель Т. А. Численное моделирование иницирования детонации при вхождении ударной волны в облако частиц алюминия // Физика горения и взрыва. — 2002. — Т. 38, № 1. — С. 114–122.
- Хмель Т. А., Федоров А. В. Взаимодействие ударной волны с облаком частиц алюминия в канале // Физика горения и взрыва. — 2002. — Т. 38, № 2. — С. 89–98.
- Хмель Т. А. Численное моделирование двумерных детонационных течений в газозвеси реагирующих твердых частиц // Матем. моделирование. — 2004. — Т. 16, № 6. — С. 73–77.
- Федоров А. В., Хмель Т. А. Типы и устойчивость детонационных течений аэрозвесей алюминия в кислороде // Физика горения и взрыва. — 1996. — Т. 32, № 2. — С. 74–85.
- Федоров А. В., Хмель Т. А. Математическое моделирование детонации алюминиевой пыли в кислороде с учетом скоростной неравновесности частиц // Физика горения и взрыва. — 1997. — Т. 33, № 6. — С. 80–91.
- Федоров А. В., Хмель Т. А. Взаимодействие детонационных волн и волн разрежения в аэрозвесей частиц алюминия в кислороде // Физика горения и взрыва. — 1997. — Т. 33, № 2. — С. 102–110.
- Strauss W. A. Investigation of the detonation of aluminum powder-oxygen mixtures // AIAA Journal. — 1968. — V. 6, N 12. — P. 1753–1761.
- Fedorov A. V., Khmel T. A. Formation of two-dimensional detonation structure in aluminum gas suspension in a channel // Confined Detonations and Pulse Detonation Engines / G. Roy et al. (Eds). — Moscow: Torus press, 2003. — P. 141–156.
- Федоров А. В., Хмель Т. А. Численное моделирование формирования ячеистой гетерогенной детонации частиц алюминия в кислороде // Физика горения и взрыва. — 2005. — Т. 41, № 4. — С. 84–98.
- Veysiére B., Ingnoli W. Existence of the detonation cellular structure in two-phase hybrid mixtures // Shock Waves. — 2003. — V. 12. — P. 291–299.
- Zhang F., Gronig H. Transition and structure of dust detonations // Dynamic Structure of Detonation in Gaseous and Dispersed Media / A. A. Borisov (Ed.). — Kluwer Academic Publ., 1991. — P. 157–213.
- Khmel T., Fedorov A. V., Kratova Yu. V. Heterogeneous detonation of monodisperse and polydisperse gas-particle mixtures: recent accomplishments // Explosion Dynamics and Hazards / S. M. Frolov, F. Zhang, P. Wolanski (Eds). — Moscow: Torus-press, 2010. — P. 273–290.
- Федоров А. В., Шульгин А. В. Сопряженная математическая модель воспламенения образцов магния // Физика горения и взрыва. — 2006. — Т. 42, № 3. — С. 57–63.



20. **Fedorov A. V., Shulgin A. V.** About stability of the ignition process of small solid particle // J. of Loss Prevention in the Process Industries. — 2007. — V. 20, N 4–6. — P. 317–321.
21. **Попов В. Н., Федоров А. В., Шульгин А. В.** Численное моделирование частицы магния в неоднородном тепловом поле // Матем. моделирование. 2007. — Т. 19, № 6. — С. 109–117.
22. **Федоров А. В., Шульгин А. В.** Воспламенение и горение частиц магния в неоднородном тепловом поле // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45, № 2. — С. 48–57.
23. **Федоров А. В., Шульгин А. В.** Моделирование горения частицы магния (задача Стефана) // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45, № 6. — С. 20–25.
24. **Деревяга М. Е., Стесик Л. Н., Федорин Э. А.** Экспериментальное исследование критических условий воспламенения магния // Физика горения и взрыва. — 1978. — Т. 14, № 6. — С. 44–49.
25. **Деревяга М. Е., Стесик Л. Н., Федорин Э. А.** Режимы горения магния // Физика горения и взрыва. — 1978. — Т. 14, № 5. — С. 3–10.
26. **Федоров А. В., Шульгин А. В.** Математическое моделирование плавления и горения металлических наночастиц // Проблемы и достижения прикладной математики и механики: к 70-летию академика В. М. Фомина: сб. науч. тр. — Новосибирск: Параллель, 2010. — С. 586–600.
27. **Федоров А. В., Фомин В. М., Шульгин А. В.** Физико-математическое моделирование горения наночастиц алюминия вблизи торца ударной трубы // Докл. АН. — 2010. — Т. 432, № 5. — С. 616–619.
28. **Lai S. L., Carlsson J. R. A., Allen L. H.** Melting point depression of Al clusters generated during the early stages of film growth: Nanocalorimetry measurements // Appl. Phys. Lett. — 1998. — V. 72, N 9. — P. 1098–1100.
29. **Hanszen K.-J.** Theoretische Untersuchungen über den Schmelzpunkt kleiner Kügelchen // Z. Phys. A Hadrons and Nuclei. — 1960. — Bd 157. — S. 523–553.
30. **Buffat Ph., Borel J.-P.** Size effect on melting temperature of gold particles // Phys. Rev. A. — 1976. — V. 13, N 8. — P. 2287–2298.
31. **Wu B., Tillman P., McCue S. W., Hill J. M.** Nanoparticle melting as a stefan moving boundary problem // J. Nanosci. and Nanotechnol. — 2009. — V. 9. — P. 885–888.
32. **Федоров А. В., Шульгин А. В.** Точечная модель горения наночастиц алюминия в отраженной ударной волне // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 3. — С. 47–51.
33. **Puri P., Yang V.** Effect of particle size on melting of aluminum at nano scales // J. Phys. Chem. C. — 2007. — V. 111. — С. 11776–11783.
34. **Aita K., Glumac N., Vanka S. P., Krieger H.** Modeling the combustion of nano-sized aluminum particles // AIAA Paper 2006-1156. — (44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit 9–12 January 2006, Reno, Nevada).
35. **Федоров А. В., Тропин Д. А., Бедарев И. А.** Математическое моделирование подавления детонации водородокислородной смеси инертными частицами // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 3. — С. 103–115.
36. **Федоров А. В., Тропин Д. А.** Определение критического размера облака частиц, необходимого для подавления газовой детонации // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 4. — С. 100–108.

*Поступила в редакцию 20/X 2011 г.*