

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННОЙ ДЕТОНАЦИИ В ГАЗОВЗВЕСЯХ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ И УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ

А. В. Фёдоров, В. М. Фомин, Т. А. Хмель

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

В систематизированном виде представлены результаты исследований, выполненных авторами в области теоретического и численного моделирования гетерогенной детонации реагирующих газовзвесей за период с 2005 г.

Ключевые слова: воспламенение, горение, детонация, угольные частицы, алюминиевые частицы.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования процессов детонации в гетерогенных смесях обусловлены прежде всего проблемами взрыво- и пожаробезопасности угольных шахт и предприятий, связанных с производством и использованием порошковых материалов. Например, мелкодисперсные и ультрадисперсные порошки алюминия имеют широкие перспективы применения как добавки к горючим газовым смесям, а в смеси с окислителем — в качестве рабочих сред в камерах детонационных двигателей.

Теоретические и численные исследования детонации в газовзвесах частиц угольной пыли или частиц металлов проводились в течение ряда лет в ИТПМ СО РАН в рамках подходов механики гетерогенных сред. Математические модели основаны на принципах механики взаимодействующих континуумов, замыкаются уравнениями приведенной химической кинетики, известными корреляциями для описания силового и энергетического взаимодействия фаз и верифицированы по известным экспериментальным данным. Детальный анализ физико-математической модели детонации газовзвеси частиц алюминия в кислороде и некоторых результатов предшествующих исследований по структуре плоских волн и ячеистой детонации представлен в [1]. В настоящей работе обсуждаются вопросы физико-математического моделирования детонации угольной пыли, а также приведены новые результаты последних исследований по

детонации монодисперсных и полидисперсных газовзвесей частиц алюминия в кислороде.

1. ДЕТОНАЦИЯ ВЗВЕСЕЙ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ

При катастрофических взрывах метана в угольных шахтах существует большая вероятность развития и поддержки детонационно-го процесса за счет воспламенения и горения угольной пыли. Инициирование стационарного распространения волн гетерогенной детонации в смесях угольной пыли с воздухом и кислородом экспериментально исследовано в [2, 3] и методами математического моделирования в [4]. В работе [4] была построена равновесная по скоростям модель механики гетерогенных сред, в то время как анализ характерных времен неравновесных процессов выявил сильное их различие. В частности, время гетерогенного горения угольной частицы много больше времени скоростной релаксации и сопоставимого с ним характерного времени выделения летучих.

В задачах инициирования детонации необходимо корректно учитывать условия воспламенения частиц. Условия за фронтом детонационной волны отличаются как от статических условий медленного нагрева, так и от условий за отраженными ударными волнами. Экспериментальные значения задержки воспламенения частиц угольной пыли в проходящих ударных волнах (УВ) [5, 6] указывают на то, что процесс воспламенения протекает в неравновесной по скоростям смеси. На ускорение воспламенения влияют рост интенсивности теплообмена (увеличение числа Нуссельта) и повышение температуры газа в пограничном слое частицы при торможении потока. Существенное снижение времени задержки воспламенения в обла-

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 06-01-00299, 08-01-92010_ННС_а).

ках угольной пыли (размер частиц $1 \div 40$ мкм) в проходящих УВ относительно воспламенения в отраженных УВ отмечался в экспериментах [7]. Оценки степени нагрева несущей фазы за счет торможения потока в условиях стесненности в плотных облаках пыли получены в [8], где ответственным за аномальное уменьшение времени задержки воспламенения считается именно этот фактор. Вышесказанное приводит к необходимости развития двухскоростных двухтемпературных моделей механики реагирующих газовзвесей.

1.1. Физико-математическая модель детонации угольной пыли с учетом стадии воспламенения

Для исследования тонкой детонационной структуры угольных пылевзвесей с учетом факторов, определяющих воспламенение, развита полуэмпирическая физико-математическая модель на основе двухскоростного двухтемпературного приближения механики гетерогенных сред. Детальное описание модели, являющейся обобщением модели [4], можно найти в [9]. Здесь отметим, что стадии воспламенения и горения описываются идентичными уравнениями, но выражения для величин, определяющих изменение масс компонентов, различаются. Также различаются аккомодационные коэффициенты, определяющие долю тепла, идущую на нагрев частицы. Так, на стадии горения принимается зависимость скорости реакций от средней температуры частиц. Для описания кинетики выделения летучих в условиях быстрого нагрева использовались уравнение и константы соответствующей реакции распыленного битуминизированного угля (Питтсбургского пласта), приведенные в [10]. Процесс поверхностного горения описывается уравнением типа аррениусовского с учетом неполного сгорания, связанного как с наличием несгораемых шлаков (золы), так и с недостатком окислителя при концентрациях угольной пыли, превышающих стехиометрический предел [4].

На стадии воспламенения предполагается, что тепло реакции окисления углерода в порах выделяется в частице, а тепло реакции окисления летучих распределяется в равных долях между газом и частицей. Также принимается во внимание, что времена задержки воспламенения угольных частиц в проходящих УВ сравнимы с характерным временем прогрева частицы. В [6] была сделана попытка учета теп-

ловой динамики внутри объема одиночной частицы, что позволило получить определенное согласование экспериментальных и расчетных данных по задержке воспламенения. В газовзвесах со значительным по массе содержанием дискретной фазы, однако, необходимо учитывать взаимное влияние фаз. Для описания стадии воспламенения в газовзвеси с учетом этих двух факторов в качестве первого приближения принимается ступенчатое распределение температуры по частице, где температура тонкого поверхностного слоя определяется температурой торможения газа. В описании динамики нагрева частиц учитываются тепловые эффекты пиролиза, горения летучих и горения кокса. В уравнении для конвективного теплообмена учитывается температура торможения потока в пограничном слое на поверхности частицы. Для описания газового компонента оказалось необходимым построить новое уравнение состояния газа с учетом изменения значения адиабаты газа, подобно тому, как это было выполнено в [11].

Расчеты в задаче о структуре детонационной волны проводились для газовзвеси частиц угля размером 50 мкм с содержанием летучих 32 % и золы 10 %. Эти параметры смеси соответствовали детонационным экспериментам [3]. Подобные частицы, как по размеру ($53 \div 74$ мкм), так и по содержанию летучих соответствующие битуминизированным углям Питтсбургского пласта, рассматривались в [6] применительно к проблемам воспламенения. Константы реакций принимались нами в соответствии с данными [12–15] для аналогичного типа угля.

1.2. Особенности воспламенения частиц угольной пыли в ударных и детонационных волнах

На рис. 1, а приведены данные расчетов [9] по задержкам воспламенения для нескольких значений концентрации частиц (сплошные линии) и данные экспериментов [3] (значки). Отметим, что результаты с большой точностью представляются в полулогарифмическом масштабе прямыми линиями, что отражает аррениусовский характер процесса воспламенения. В [9] также установлено, что динамика выделения и горения летучих определяет срыв теплового равновесия в частице. Таким образом, по классификации [16] для битуминизированного угля определен смешанный (гомогенно-гетерогенный) тип воспламенения.

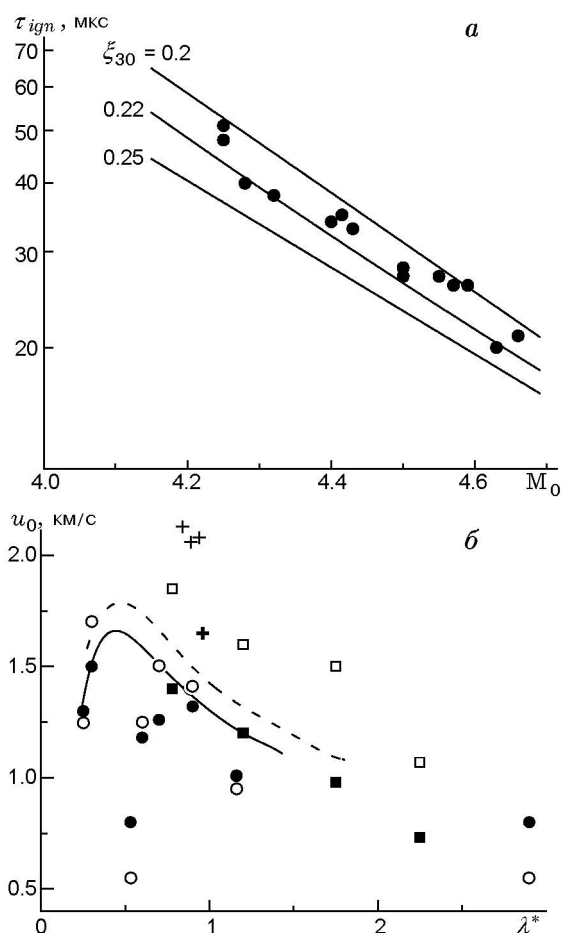


Рис. 1. Соответствие экспериментальных и расчетных данных для пылевзвесей битуминизированного угля:

a — по задержкам воспламенения в ударных волнах τ_{ign} , линии — расчет [9], значки — эксперименты [3]; *b* — по скорости детонации u_0 , сплошная линия — расчет для частиц размером 50 мкм, штриховая — 25 мкм, значки — эксперимент

1.3. Детонационные течения в пылевзвесях частиц битуминизированного угля

Для верификации модели применительно к детонационным процессам, как и в [4], используется экспериментальная зависимость скорости детонации от начальной концентрации частиц битуминизированного угля с содержанием летучих 32 % и размером частиц $53 \div 74$ мкм [3]. Сравнение расчетных и экспериментальных данных приведено на рис. 1, б: сплошная линия — расчет для частиц размером 50 мкм, штриховая — 25 мкм, $\lambda^* = (\rho_{30} + \rho_{20})/\rho_{10}$ (индексы: 0 — начальное состояние, 1 — газ, 2 — летучие, 3 — коксовая составляющая). Отметим, что частицы размером 54 и 25 мкм в [3]

(соответственно штриховая и сплошная линии на рис. 1) относятся к пылевзвесям двух различных сортов угля, отличающихся содержанием летучих.

Для определения перехода от реакции воспламенения к реакции горения в модели принимается критерий, основанный на анализе структуры течения за фронтом ударной волны. Срыв теплового равновесия (неограниченный рост температуры и ускорение выделения и горения летучих) сопровождается падением давления газа. В связи с этим точка максимума давления условно считается переходной от стадии воспламенения к стадии горения.

Пример детонационной структуры Чепмена — Жуге (ЧЖ, стадия воспламенения и начальная стадия горения) приведен на рис. 2, *a* (концентрация $\xi_{30} = 0.3$, скорость детонации $u_0 = 1.45$ км/с). Излом в распределении температуры частиц указывает на точку воспламенения, где тепловыделение химических реакций полностью переходит в газовую фазу. На последующей стадии поверхностного горения частицы процессы протекают в условиях скоростного равновесия фаз (рис. 2, *b*, $\xi_{30} = 0.2$, $u_0 = 1.67$ км/с). Отметим, что в детонационных волнах время горения коксовой составляющей более чем на два порядка превышает время задержки воспламенения и значительно больше характерных времен тепловой и скоростной релаксации фаз. Поэтому, за исключением узкой зоны неравновесных процессов за фронтом лидирующей УВ, структура течения совпадает с полученной в рамках односкоростной модели [4]. Тем не менее учет процессов, протекающих в этой зоне и определяющих динамику воспламенения частиц, необходим для адекватного описания инициирования и распространения детонации в различных условиях.

2. ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛОСКОЙ И ЯЧЕИСТОЙ ДЕТОНАЦИИ В ПОЛИДИСПЕРСНЫХ ГАЗОВЗВЕСЯХ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ И КИСЛОРОДА

Теоретические и численные исследования детонации газовзвесей частиц алюминия в кислороде проводятся нами на основе физико-математической модели, базовые принципы которой заложены в работах [17, 18] и соответствуют подходу механики гетерогенных сред [19]. Детальное изложение модели представлено в [20–23], в [24] в модель включена аппрок-

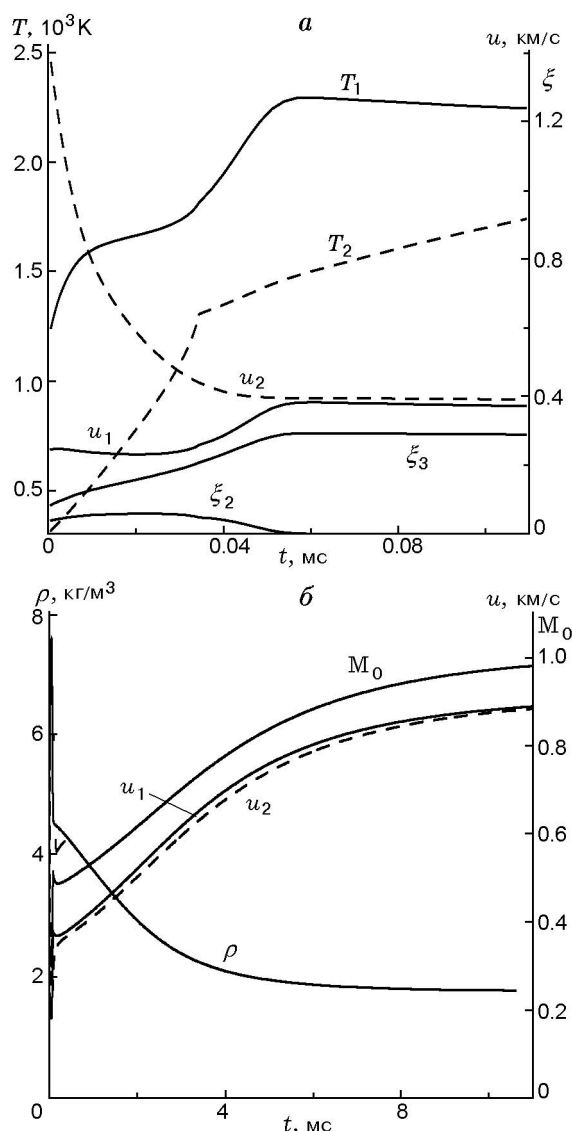


Рис. 2. Структура волны детонации в газозвеси угольной пыли:
 а — стадия воспламенения; б — выход в состояние Чепмена — Жуге

симация экспериментальной зависимости времени горения от радиуса частиц для описания реального времени горения частиц. Модель [20–24] применялась для решения ряда задач, в частности для численного моделирования двумерных течений ячеистой детонации [24]. Результаты исследований в обобщенном виде изложены в [1].

Исследования [1, 20–24] проводились для монодисперсных взвесей. В то же время большинство порошков характеризуются определенным разбросом в распределении частиц по

размерам. Учет полидисперсности позволит уточнить влияние фракционного состава на порог инициирования детонации, что важно для предотвращения нежелательных взрывных и детонационных процессов, а также оценок перспектив использования порошков алюминия в качестве топлива (или добавок к топливам) в детонационных двигателях. Первым шагом в исследовании полидисперсных газозвесей является рассмотрение смесей газа и нескольких фракций частиц различного диаметра (взвесей со ступенчатой функцией распределения частиц по размерам). Физико-математическая модель является обобщением модели, применяемой в работах [20–24] для полидисперсной смеси.

2.1. Стационарные плоские волны в бидисперсных взвесах

В данном пункте рассматриваются детонационные процессы во взвеси, состоящей из двух фракций частиц различного размера, суммарная концентрация которых соответствует точке стехиометрии. Состав смеси характеризуется параметром насыщенности η , равным отношению плотностей мелкой и крупной фракций в начальном состоянии.

Структуры стационарных детонационных волн в таких смесях зависят от параметра насыщенности и отличаются от структур волн в монодисперсных взвесах. Подробный анализ соответствующих одномерных детонационных течений проведен в [25]. Так же как и в монодисперсных взвесах частиц алюминия, детонация в бидисперсных взвесах не является идеальной. Для смеси характерны промежуточные скорости звука, например, равновесно-замороженная скорость звука, которая отвечает равновесию с газом для мелкой фракции и замороженному состоянию для крупной фракции.

В зависимости от скорости детонации u_0 траектория, представляющая решение, либо стремится к конечному состоянию пересжатой детонации, либо ограничивается линией запаривания. Положение и тип точки ветвления зависят от параметра насыщенности. При доминировании в смеси крупных частиц ($\eta < 0.5$) точка ветвления решения практически является звуковой как по замороженной, так и по равновесно-замороженной скорости звука (соответствующие числа Маха близки и стремятся к 1 при $\eta = 0$). При доминировании мел-

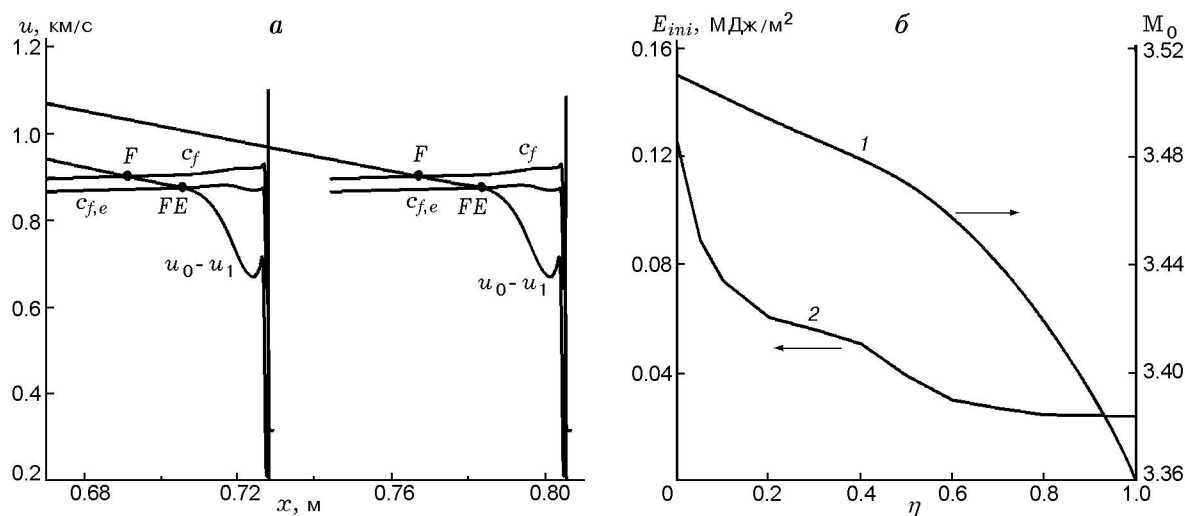


Рис. 3. Плоские детонационные волны в бидисперсных взвесьях:

a — взаимодействие детонационной волны с примыкающей волной разрежения, $\Delta t = 0.05$ мс, $\eta = 0.5$;
б — критерии инициирования

ких частиц ($\eta \geq 0.5$) состояние в точке ветвления является околосзвуковым по равновесно-замороженной скорости звука, при этом выйти в сверхзвуковое равновесное состояние в стационарной постановке не удастся. Численное моделирование нестационарной задачи распространения детонации в сопряжении с волной разрежения показало, что стационарный участок ограничивается равновесно-замороженной звуковой точкой (FE на рис. 3, *a*). Волна разрежения смыкается с замороженной звуковой точкой (F на рис. 3, *a*). Переходный межзвуковой ($c_{f,e} < v_1 < c_f$) участок между точками F и FE является нестационарным, протяженность его растет со временем.

Другая особенность детонационной структуры в бидисперсной взвеси состоит в существовании двух ρ -слоев (резкий рост плотности частиц), отдельно в каждой фракции крупных и мелких частиц. Соответственно профили давления и плотности газа могут принимать форму кривых с двумя точками локального максимума. В зависимости от параметра насыщенности величина первого максимума может быть как выше, так и ниже второго.

Таким образом, структуры детонационных волн в бидисперсных взвесьях отличаются от структур монодисперсных взвесей. Наличие разномасштабных релаксационных процессов, присущих различным фракциям, оказывает влияние на процессы воспламенения за ударной волной и инициирования детонации.

2.2. Иницирование плоских волн в бидисперсных взвесьях

Задача ударно-волнового инициирования детонации решалась для двух типов инициирующего воздействия: поддерживаемых УВ (с прямоугольным профилем параметров) и взрывных УВ (с примыкающей волной разрежения). В первом случае инициирование детонации происходит по «мягкому» [22], или комбинированному, сценарию. Мелкие частицы воспламеняются непосредственно за фронтом лидирующей УВ, более крупные — на следующем за УВ контактном разрыве, впоследствии фронт горения ускоряется, догоняет и усиливает лидирующую УВ. Условие инициирования определяется амплитудой инициирующей УВ (M_0). С увеличением η происходит монотонное уменьшение критического значения M_0 от 3.51 (соответствующего взвеси с размером частиц 3.5 мкм) до 3.36 (взесь с размером частиц 1 мкм) (рис. 3, *б*, кривая 1). Отметим нелинейную зависимость $M_0(\eta)$.

Для сильных взрывных волн ($M_0 = 5$) определяющим условием является величина запасенной энергии E_{ini} . Согласно расчетным данным, наиболее резкое снижение критического значения энергии инициирования имеет место при увеличении η от 0 до 0.2 (кривая 2 на рис. 3, *б*). Так, 5 % мелких частиц ($\eta = 0.05$) уже обеспечивают снижение E_{ini} почти на 30 %, а 10 % ($\eta = 0.1$) — на 40 %. Физическая причина такого резкого снижения

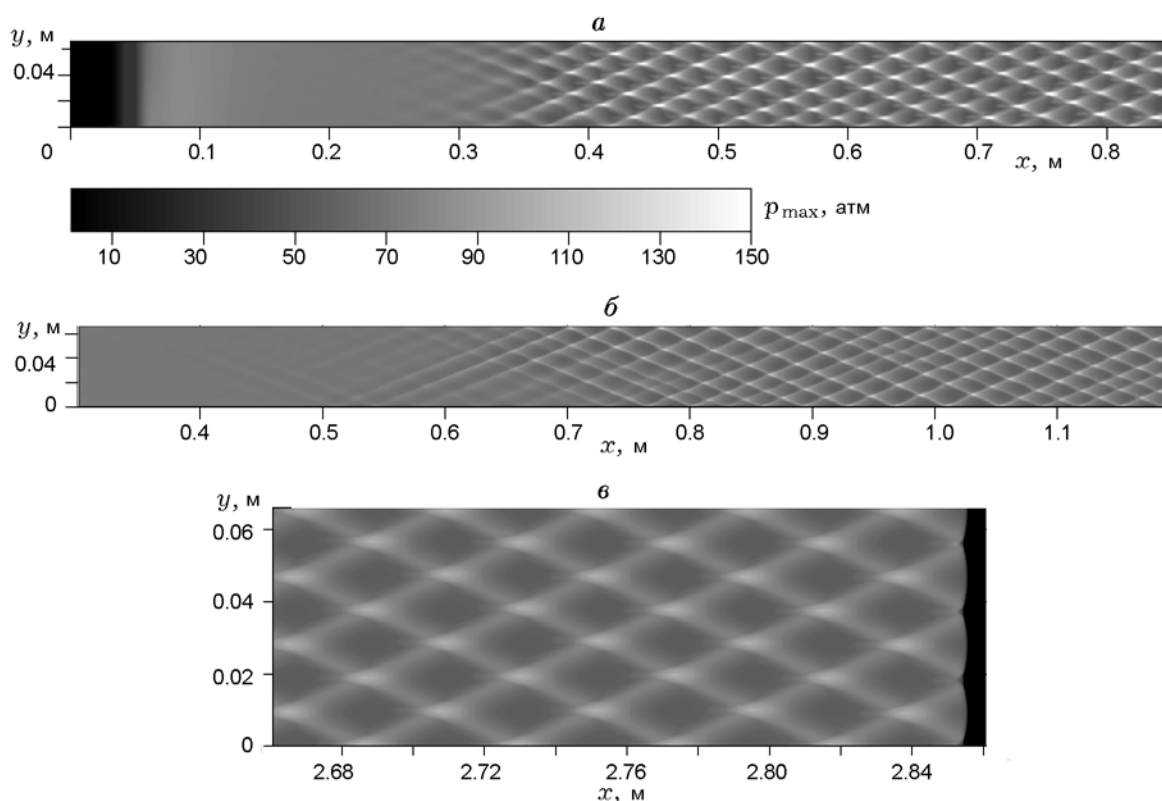


Рис. 4. Формирование ячеистой детонации:

a — монодисперсная взвесь частиц размером 2 мкм; *б* — бидисперсная взвесь частиц размером 2 и 1 мкм, $\eta = 0.5$; *в* — трехфракционная взвесь частиц размером 1, 2 и 3.5 мкм, $\eta_2 = 0.5$

порога инициирования состоит в том, что для инициирования детонации во фракции крупных частиц частично используется энергия, выделяемая при горении воспламенившихся раньше мелких частиц.

При некоторых условиях на начальной стадии инициирования в смеси возникает нестационарная двухфронтная структура. Ее формирование связано с возможностью комбинированного сценария инициирования, в котором сочетаются свойства «жесткого» и «мягкого» типов [22, 25]. Двухфронтная структура существует ограниченное время и не является стационарной. Впоследствии два фронта сливаются в один, формируя пересжатую волну, которая ослабляется и распространяется далее в режиме нормальной детонации.

2.3. Ячеистая детонация в бидисперсных взвесах

Экспериментальные подтверждения существования ячеистой гетерогенной детонации в газовзвесах металлических или органических

частиц получены в [26–29]. Численное моделирование двумерных детонационных течений с ячеистыми структурами в газовзвесах частиц алюминия проводилось в [24, 29–32]. В [24] с использованием модели монодисперсной стехиометрической смеси алюминия в кислороде численно установлена связь между размером ячейки и диаметром частиц в форме степенной зависимости с показателем 1.6. В [30] моделировалось распространение ячеистой детонации в бедных взвесах частиц алюминия в кислороде для двух размеров частиц — 1 и 3.5 мкм. Результаты [24] и [30], полученные с использованием различных моделей, тем не менее неплохо согласуются между собой и с экспериментальными данными [26]. Позднее в [31] была получена аналогичная степенная зависимость размера ячейки от диаметра частиц с близким по значению показателем степени 1.4 для монодисперсных взвесей алюминия в воздухе.

Отметим, что моделирование детонационных процессов в [30, 31] проводилось в рамках

представлений диффузионно-лимитированного горения частиц алюминия в воздухе. Ограниченность данной модели горения обсуждалась в [29], где предложена гибридная модель, сочетающая кинетику аррениусовского и диффузионного типов. В рамках предложенной в [29] модели удалось адекватно описать некоторые свойства детонационных процессов, в частности зависимость результатов перехода дефлаграции в детонацию от начального давления в смеси. Кроме того, в экспериментах [29] отмечается вырожденный характер ячеистой детонации, что проявляется в низких значениях амплитуды пульсаций давления за фронтом. Авторы объясняют это наличием стадии диффузионно-лимитированного горения. Как будет показано ниже, возможно и иное объяснение вырождения ячеистой детонации в газовзвесах.

Поскольку реальные смеси обычно характеризуются определенным разбросом в размерах частиц, то представляет интерес вопрос о существовании и характере ячеистой детонации в полидисперсных взвесах. Первым шагом в численном моделировании ячеистой детонации полидисперсных смесей также было рассмотрение бидисперсных газовзвесей частиц алюминия в кислороде [32].

Расчеты двумерных течений проводились в рамках указанной выше модели с применением численной технологии, описанной в [33, 34]. Задача ударно-волнового инициирования детонации ставилась как начально-краевая задача для используемой системы уравнений при некотором малом возмущении плотности частиц на кромке облака взвеси.

Расчеты показали, что при значительном доминировании одной из фракций ячеистая детонация формируется и подобна детонации в соответствующей монодисперсной взвеси. Однако имеются и отличительные особенности. Прежде всего, это уменьшение максимальных значений пикового давления в тройных точках. На картинах максимального давления $p_{\max}(x, y) = \max_t[p(x, y, t)]$ (рис. 4), построенных в единой теневой шкале, это выражается в уменьшении контрастности рисунка (ср. рис. 4,б и рис. 4,а). Второй отличительной чертой является задержка развития поперечных волн (ср. рис. 4,б и рис. 4,а), которая тем больше, чем больше доля частиц другой фракции. Третье отличие — тенденция к вырождению ячеистой детонации при средних значениях параметра насыщенности (рис. 5):

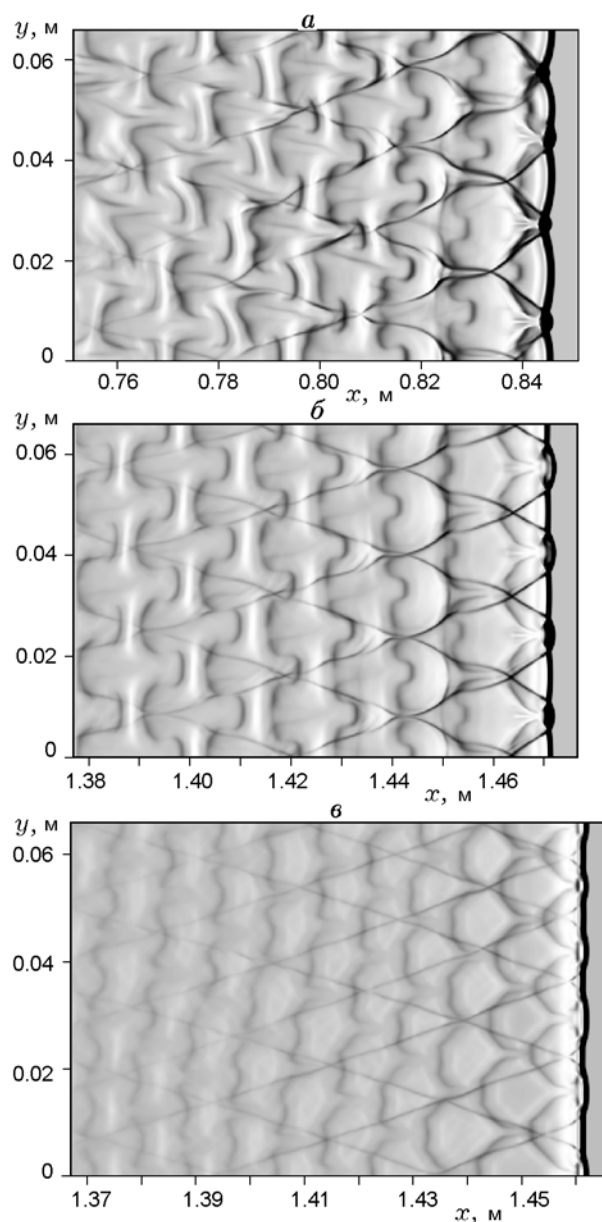


Рис. 5. Влияние состава бидисперсной смеси на характер ячеистой детонации: $\eta = 0$ (а), 0.3 (б), 0.6 (в)

фронт лидирующей УВ приближается к плоской волне, поперечные волны менее искривлены, амплитуда изменений параметров уменьшается. Таким образом, детонация в бидисперсных взвесах обладает некоторыми промежуточными свойствами плоской детонации и ячеистой детонации. Влияние параметра насыщенности на максимальные значения давления показано на рис. 6. Для смесей частиц размером 1 и 2 мкм приведена также расчетная за-

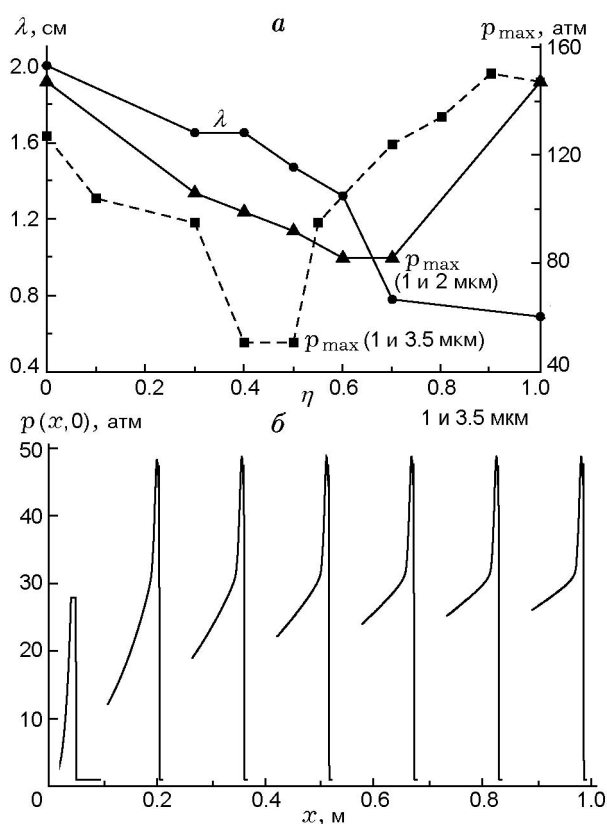


Рис. 6. Вырождение ячейистой детонации в бидисперсных взвесах:

a — зависимости характеристик процесса от параметра насыщенности; *б* — устойчивое распространение плоской волны в смеси частиц размером 1 ÷ 3.5 мкм при $\eta = 0.5$

висимость размера детонационной ячейки λ от состава.

В расчетах обнаружено, что для некоторых бидисперсных взвесей имеет место полное вырождение ячейистой детонации, при котором система поперечных волн не формируется вовсе. В смеси частиц размером 1 и 3.5 мкм это наблюдается, например, при $\eta = 0.4$ и 0.5, о чем свидетельствует поведение зависимости $p_{\max}(\eta)$ (см. рис. 6, *a*). В этих случаях в двумерных расчетах моделируется устойчивое распространение плоской волны детонации (рис. 6, *б*, профили давления на стенке с шагом 0.1 мс).

2.4. Применение методов акустического подхода для анализа ячейистой детонации в газовзвесах

В работе [32] получено подтверждение и приведено некоторое объяснение свойства вырождения ячеек в двухфракционных газовзвесах

на основе акустического анализа структуры плоской волны стационарной детонации. В [35] показано, что первичное возмущение на фронте волны детонации порождает на фронте две дополнительные, равноудаленные от начального возмущения «горячие» точки. Их местоположение определяется из решения соответствующей задачи акустики для поля течения плоских волн Чепмена — Жуге или волн с некоторой степенью пересжатия или затухания. Согласно [35] расстояние между следующими друг за другом поперечными волнами определяется по формуле

$$\lambda_{ac} = 4 \int_0^X \frac{c_f}{\sqrt{\sigma_*^2 - (c_f^2 - v_1^2)}} dx. \quad (1)$$

Применительно к гетерогенной смеси c_f — замороженная скорость звука, v_1 — скорость газа в системе, связанной с фронтом. Верхний предел интегрирования X соответствует точке $\sigma = c_f^2 - v_1^2$. Входящая в (1) константа σ_* выбирается из всех допустимых значений σ (при которых подкоренное выражение положительно) таким образом, чтобы обеспечивался минимум интеграла времени:

$$t = 2 \int_0^X \frac{c_f \sigma}{(c_f^2 - v_1^2) \sqrt{\sigma^2 - (c_f^2 - v_1^2)}} dx. \quad (2)$$

Более подробное изложение методологии [35] применительно к газовзвесам приведено в [24, 32]. Оценки размера ячейки монодисперсных взвесей, исследованных в [24], хорошо согласуются с данными численного эксперимента как по абсолютным значениям, так и по показателю степени в зависимости от размера частиц.

В бидисперсных смесях в зависимости от параметра насыщенности возможны случаи, когда константа σ_* и величины t и λ_{ac} не определяются. Это означает, что не происходит порождения новых «горячих» точек на определенном расстоянии от исходного возмущения. Возможны ситуации, когда в поле течения ЧЖ величина λ_{ac} определяется, а для пересжатых или затухающих волн не определяется. Это свойство может быть одним из объяснений частичного вырождения ячейистой детонации (детальный анализ проведен в [32]). Таким образом, применение метода [35] для газовзвесей позволяет на основе известных данных о

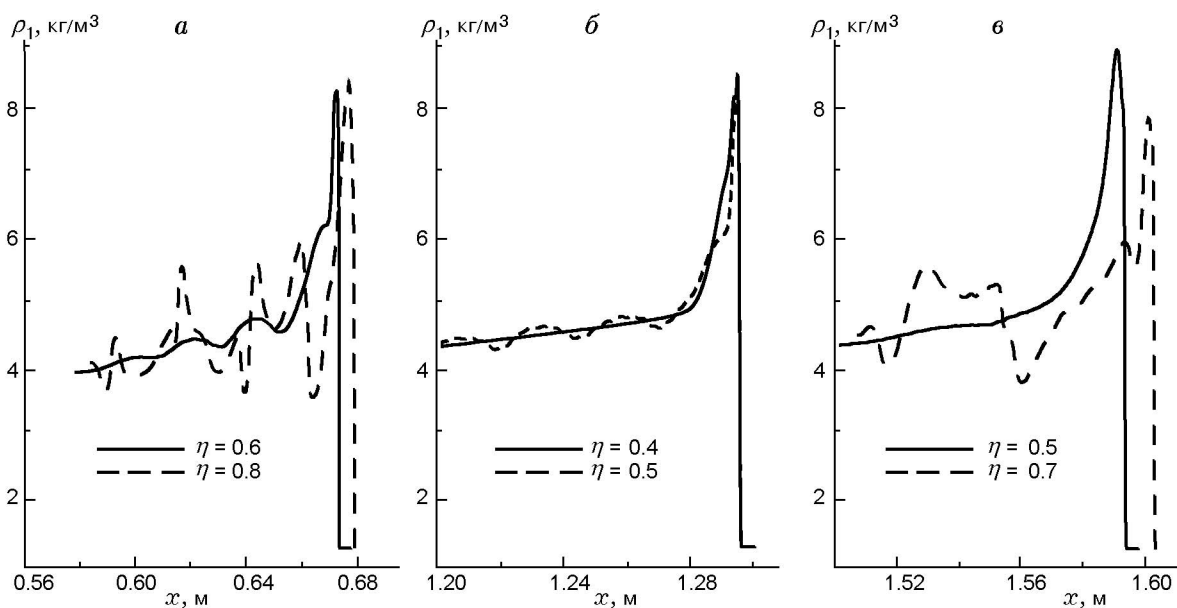


Рис. 7. Вырождение ячеистой детонации в полидисперсных трехфракционных (а, б) и пятифракционных (в) взвесьях

структуре стационарных плоских волн детонации получить информацию о характере ячеистой детонации и оценки размера детонационной ячейки.

2.5. Плоская и ячеистая детонация в полидисперсных газовзвесьях с доминированием средней фракции

Представляет интерес вопрос, свойственно ли вырождение ячеистой детонации реальным полидисперсным газовзвесьям. Для этого были рассмотрены трех- и пятифракционные смеси с симметричной функцией распределения. Оказалось, что применение акустического метода [35] позволяет определить поперечный размер ячейки для смесей при значительном доминировании средней фракции. При доле средней фракции $\eta \leq 0.4$ (как для трех-, так и пятифракционных взвесей) профили $c_f^2 - v_1^2$ характеризуются одной точкой локального максимума, что указывает на отсутствие детонационных ячеек в таких смесях.

Результаты численного моделирования формирования ячеистой детонации в соответствующих полидисперсных взвесьях приведены на рис. 4 и 7 и полностью подтверждают вышесказанные предположения. На теневых картинах максимального давления (см. рис. 4, в) видно, что характер ячеистой детонации тот же, что и в бидисперсных взвесьях. На рис. 7

приведены профили плотности газа на стенке в некоторый фиксированный момент времени. Прослеживается уменьшение амплитуды осцилляций в течении за фронтом детонации при уменьшении η . При $\eta \leq 0.4$ в двумерных расчетах моделируется устойчивое распространение плоской волны детонации (сплошная линия на рис. 7, б). Таким образом, в рассмотренных многофракционных взвесьях с долей средней фракции не более 40 % ячеистая детонация из малых возмущений не развивается. При большем доминировании средней фракции ячеистая детонация формируется, однако носит вырожденный характер.

Таким образом, из результатов численного моделирования и проведенного акустического анализа следует, что не только размер детонационной ячейки, но и само существование ячеистой гетерогенной детонации, а также ее характер зависят от фракционного состава газовзвеси и распределения частиц по размерам.

Заметим, что вырождение ячеистой детонации (уменьшение амплитуды пульсаций давления) регистрировалось в ряде экспериментов, результаты которых опубликованы в [29]. Авторы [29] выдвинули гипотезу, что это может быть связано с влиянием стадии диффузионно-лимитированного горения частицы алюминия, которое описывается кинетикой неаррениусовского типа. Однако отметим, что,

с одной стороны, в работе [30] в рамках кинетической модели диффузионно-лимитированного горения частицы алюминия моделируются развитые ячеистые структуры в монодисперсных взвесах. С другой стороны, приведенные в [29] фотографии порошков алюминия, используемых в экспериментах, явно обнаруживают признаки полидисперсности. Таким образом, вырождение ячеистой детонации, установленное на основе численного моделирования и акустического анализа в рамках нашей модели при учете полидисперсности смеси, согласуется с экспериментальными наблюдениями [29]. Кроме того, теоретически предсказанная возможность вырождения ячеистой детонации в полидисперсных взвесах может быть одним из объяснений того, что пока в очень немногих экспериментах по детонации газовзвесей реагирующих частиц удается наблюдать ячеистоподобные структуры.

ВЫВОДЫ

В работе дано обобщенное изложение полученных ранее результатов в области гетерогенной детонации газовзвесей частиц угля и алюминия. Показано, что полуэмпирические модели детонации газовзвесей частиц угольной пыли и частиц алюминия, основанные на подходах механики гетерогенных сред и уравнениях приведенной химической кинетики, позволяют адекватно описывать комплексные одномерные и двумерные детонационные течения.

Математическая модель гетерогенной детонации газовзвеси угольной пыли, принимающая во внимание воспламенение и горение частиц, согласована с экспериментальными данными как по зависимости скорости стационарной детонации от концентрации частиц, так и по зависимостям времени задержки воспламенения от числа Маха УВ. Проведенный анализ выявил определяющее влияние динамики выхода и горения летучих на воспламенение взвеси частиц битуминизированного угля, которое происходит по смешанному (гомогенно-гетерогенному) механизму. Показано, что скоростная неравновесность играет важную роль в воспламенении и, следовательно, инициировании гетерогенной детонации в газовзвесах частиц угля с высоким содержанием летучих.

Численное и теоретическое исследование детонации в полидисперсных взвесах частиц алюминия в кислороде выявило следующие особенности одномерных и двумерных течений:

- детонация в бидисперсной взвеси является неидеальной, стационарная часть структуры ограничивается равновесно-замороженной звуковой точкой, детонационная структура характеризуется двойным ρ -слоем;

- определены нелинейные зависимости критического числа Маха УВ и энергии инициирования взрывных УВ от параметра насыщенности; при этом присутствие малого количества мелких частиц в смеси может обеспечить значительное снижение энергии инициирования;

- возможны комбинированные сценарии инициирования детонации, при которых происходит «жесткое» инициирование в мелкой фракции и «мягкое» в крупной; при этом допустимо временное существование нестационарных двухфронтовых структур;

- в полидисперсных взвесах происходит частичное вырождение ячеистой детонации с ослаблением поперечных волн и спрямлением фронта; характер ячеистой детонации и размер детонационной ячейки зависят от фракционного состава смеси;

- в смесях со значительной дисперсией в распределении частиц по размерам возможны полное вырождение ячеек и устойчивое распространение плоской волны детонации;

- результаты численного моделирования двумерных детонационных течений коррелируют с данными акустического анализа и согласуются с новыми данными экспериментов, свидетельствующими о вырожденном характере ячеистой детонации в газовзвесах частиц алюминия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фёдоров 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, № 6. — С. 126–136.
2. Nettleton M. A., Stirling R. Detonation in suspensions of coal dust in oxygen // Combust. Flame. — 1973. — V. 21. — P. 307–314.
3. Эдвардс Д., Фернлей Р., Неттлтон М. Исследование детонации взвесей угольной пыли в смесях кислорода с азотом в ударной трубе // Физика горения и взрыва. — 1987. — Т. 23, № 2. — С. 129–136.
4. Фёдоров А. В., Хмель Т. А. Математическое моделирование детонационных процессов в газовзвеси частиц угля // Физика горения и взрыва. — 2002. — Т. 38, № 6. — С. 103–112.

5. **Борисов А. А., Гельфанд Б. Е., Цыганов С. А. и др.** Воспламенение пылей за ударными волнами // Хим. физика. — 1983. — № 8. — С. 1127–1128.
6. **Sichel M., Baek S. W., Kauffman C. W., Maker B., Nicholls J. A.** The shock wave ignition of dusts // AIAA Journal. — 1985. — V. 23, N 9. — P. 1374–1380.
7. **Бойко В. М., Папырин А. Н., Поплавский С. В.** О влиянии летучих на задержки воспламенения газозвеси угольных пылей в ударных волнах // Физика горения и взрыва. — 1991. — Т. 27, № 2. — С. 101–111.
8. **Бойко В. М., Папырин А. Н., Поплавский С. В.** О механизме воспламенения пылей в проходящих ударных волнах // Физика горения и взрыва. — 1993. — Т. 29, № 3. — С. 143–148.
9. **Федоров А. В., Хмель Т. А.** Математическое моделирование гетерогенной детонации угольной пыли в кислороде с учетом воспламенения // Физика горения и взрыва. — 2005. — Т. 41, № 1. — С. 89–99.
10. **Smoot L. D., Horton M. D., Williams G. A.** Propagation of laminar pulverized coal-air flames // 16th Intern. Symp. on Combustion. — Pittsburgh: The Combustion Inst., 1977. — P. 375–387.
11. **Кореньков В. В., Охитин В. Н.** Численная оценка влияния плотности ВВ на параметры воздушных ударных волн // ПМТФ. — 1983. — № 3. — С. 127–130.
12. **Ubhayakar S. K., Stickler D. B., Von Rosenberg C. W., Gannon, Jr, R. E.** Rapid devolatilization of pulverized coal in hot combustion gases // 16th Intern. Symp. on Combustion. — Pittsburgh: The Combustion Inst., 1976. — P. 427–436.
13. **Lester T. W., Seeker W. R., Merklin J. F.** The influence of oxygen and total pressure on the surface oxidation rate of bituminous coal // 18th Intern. Symp. on Combustion. — Pittsburgh: The Combustion Inst., 1981. — P. 1257–1265.
14. **Smith I. W.** The combustion rates of coal chars: A review // 19th Intern. Symp. on Combustion. — Pittsburgh: The Combustion Inst., 1982. — P. 11045–1065.
15. **Libby P. A., Blake T. A.** Theoretical study of burning carbon particles // Combust. Flame. — 1979. — V. 36. — P. 139–169.
16. **Гостеев Ю. А., Федоров А. В.** Воспламенение газозвеси частиц угля. Точечное приближение // Физика горения и взрыва. — 2001. — Т. 37, № 6. — С. 36–45.
17. **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.
18. **Федоров А. В.** Структура гетерогенной детонации частиц алюминия, диспергированных в кислороде // Физика горения и взрыва. — 1992. — Т. 28, № 3. — С. 72–83.
19. **Нигматуллин Р. И.** Динамика многофазных сред. — М.: Наука, 1987. — Ч. 1, 2.
20. **Федоров А. В., Хмель Т. А.** Типы и устойчивость детонационных течений аэрозвеси алюминия в кислороде // Физика горения и взрыва. — 1996. — Т. 32, № 2. — С. 74–85.
21. **Fedorov A. V., Fomin V. M., Khmel' T. A.** Non-equilibrium model of steady detonations in aluminum particle-oxygen suspensions // Shock Waves. — 1999. — V. 9, N 5. — P. 313–318.
22. **Федоров А. В., Хмель Т. А.** Численное моделирование инициирования детонации при вхождении ударной волны в облако частиц алюминия // Физика горения и взрыва. — 2002. — Т. 38, № 1. — С. 114–122.
23. **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.
24. **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.
25. **Федоров А. В., Хмель Т. А.** Структура и инициирование плоских волн детонации в бидисперсной газозвеси частиц алюминия // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 2. — С. 46–55.
26. **Ingignoli W., Veysiére B., Khasainov B. A.** Study of detonation initiation in unconfined aluminium dust clouds // Gaseous and Heterogeneous Detonations / G. D. Roy, S. M. Frolov, K. Kailasanath, N. N. Smirnov (Eds). Moscow: ENAS Publishers, 1999. — P. 337–350.
27. **Zhang F., Gronig H., van de Ven A.** DDT and detonation waves in two-phase mixtures // Shock Waves. — 2001. — V. 11. — P. 53–71.
28. **Zhang F., Gerrard K. B., Ripley R. C., Tanguay V.** Unconfined aluminum particles-air detonation // Proc. 26th Intern. Symp. on Shock Waves. July 2007, Goettingen, Germany. — P. 15–20.
29. **Zhang F., Gerrard K. B., Ripley R. C.** Reaction mechanism of aluminum particles-air detonation // Proc. of the 7th Intern. Symp. on Hazard, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions. July 2008, St. Petersburg, Russia. — V. II. — P. 223–237.
30. **Benkiewicz K., Hayashi A. K.** Two-dimensional numerical simulations of multi-headed detonations in oxygen-aluminum mixtures using an adaptive mesh refinement // Shock Waves. — 2003. — V. 13. — P. 385–402.
31. **Veysiére B., Khasainov B. A., Briand A.** Investigation of detonation initiation in aluminum suspensions // Shock Waves. — 2008. — V. 18. — P. 307–315.

32. **Федоров А. В., Хмель Т. А.** Формирование и вырождение ячеистой детонации в бидисперсных газозвесах частиц алюминия // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 3. — С. 109–120.
33. **Хмель Т. А.** Численное моделирование двумерных детонационных течений в газозвеси реагирующих твердых частиц // Матем. моделирование. — 2004. — Т. 16, № 6. — С. 73–77.
34. **Федоров А. В., Хмель Т. А.** Численные технологии исследования гетерогенной детонации газозвесей // Матем. моделирование. — 2006. — № 8. — С. 49–63.
35. **Barthel H. O.** Predicted spacings in hydrogen-oxygen-argon detonations // The Physics of Fluids. — 1974. — V. 17, N 8. — P. 1547–1553.

Поступила в редакцию 25/X 2008 г.
