

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОГО РАЗМЕРА ОБЛАКА ЧАСТИЦ, НЕОБХОДИМОГО ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ

А. В. Фёдоров, Д. А. Тропин

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

Исследуются условия подавления детонации путем введения инертных частиц в реагирующую газовую смесь, по которой распространяется детонационная волна. Определены картина детонационного течения и сценарий его подавления. Рассчитана минимальная длина облака частиц, которое полностью гасит детонационную волну. 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 котором происходит гашение волны воспламенения/горения, образующейся при распаде детонационной волны. Показано, что для различных конфигураций распределения объемной концентрации частиц в облаке эта длина примерно одинакова.

Ключевые слова: подавление детонации, математическое моделирование, смесь реагирующих газов и инертных частиц.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование детонации привлекает большое внимание на протяжении многих лет, в том числе и в связи с проблемой предотвращения катастрофических взрывов. Изначально основные усилия были направлены на исследование детонации в реагирующих газах. Прогресс в данной области газовой детонации проложил путь к исследованию значительно более сложных явлений, происходящих в детонационной волне (ДВ) в двухфазных смесях. В настоящее время имеется определенная экспериментальная информация о гетерогенной детонации смеси реагирующего газа с инертными частицами [1–3]. Эти исследования показывают, что частицы с небольшим диаметром и некоторой массой их облака могут привести к разрушению ДВ.

Наряду с экспериментальными исследованиями, были предприняты попытки численного моделирования гетерогенной детонации реагирующих газов с инертными частицами [4–11] в рамках модели двухскоростной двухтемпературной механики реагирующих гетерогенных сред, дополненной кинетическими уравнениями для описания неравновесных химических реакций воспламенения и горения. Использование разветвленных кинетических механизмов для описания химических превращений в смесях требует больших расходов вычислительных ресурсов. Поэтому большинство расчетов

проведено с применением моделей равновесной или приведенной кинетики химических превращений в ДВ. Тем не менее, детальные кинетические механизмы, описывающие химические реакции за фронтом ДВ, также использовались в ряде работ, например [11–13]. В работе [13] была проведена верификация математической модели с детальной кинетикой по зависимостям времени задержки воспламенения от температуры. На основе этой кинетической модели в [11] получены концентрационные пределы детонации. При этом ДВ входила в полубесконечное облако частиц и распадалась на замороженную ударную волну (УВ) и отстающую волну (фронт) воспламенения/горения (ВВГ). Таким образом, оставался открытым вопрос о том, какой длины должно быть облако частиц, чтобы после выхода из него такого волнового комплекса инициирование ДВ не произошло. Именно эта задача и решается в настоящей работе.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим ударную трубу, заполненную стехиометрической смесью водорода и кислорода, а также облаком частиц песка длиной L , расположенным на расстоянии $l = 30$ см от диафрагмы, разделяющей камеру высокого давления (КВД), заполненную в начальный момент времени средой с давлением $p_1 = 20$ атм и температурой $T_1 = 3000$ К, и камеру низко-

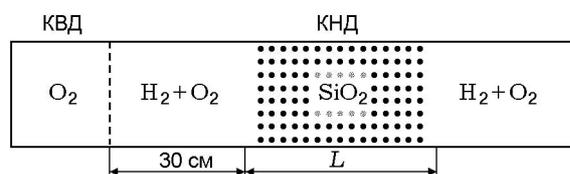


Рис. 1. Постановка задачи

го давления (КНД) с начальными параметрами $p_0 = 1$ атм, $T_0 = 300$ К (рис. 1). После разрыва диафрагмы в КНД инициируется ДВ, которая до входа в облако (фильтр) частиц выходит на режим Чепмена — Жуге (ЧЖ). Система уравнений, описывающая данное явление в рамках неравновесной газовой динамики, имеет вид уравнений (1)–(3) из [11].

Задача подавления детонации ставится в следующем виде: определить минимальную длину облака частиц L_* , такую чтобы волновой процесс после выхода из облака не мог вновь инициировать детонацию в смеси.

Эту минимальную длину будем называть критической. Для расчета подавления ДВ в облаке частиц были выбраны частицы песка диаметром $d = 10$ и 100 мкм с предельной объемной концентрацией m_2^* , соответствующей подавлению ДВ в смеси газа с частицами; $m_2^* = 2 \cdot 10^{-4}$ и $2 \cdot 10^{-3}$ соответственно при $d = 10$ и 100 мкм (см. [11]). На рис. 2 приведе-

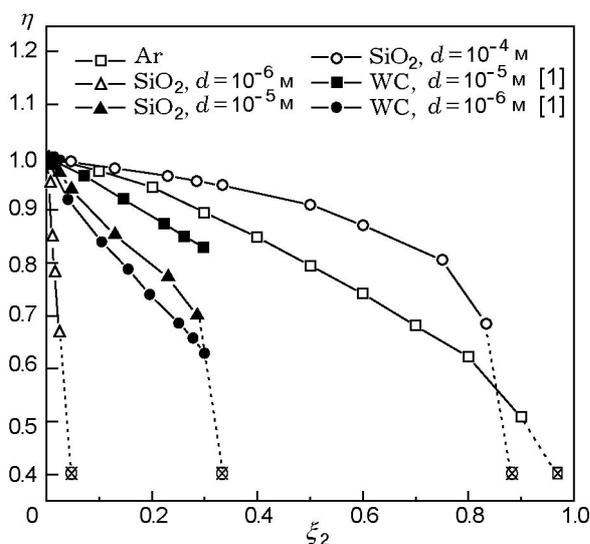


Рис. 2. Зависимость дефицита скорости детонации от массовой концентрации инертных компонентов. Концентрационные по массовой доле частиц пределы детонации

ны зависимости дефицита скорости детонации $\eta = D/D_{CJ}$ (где D — скорость детонации в смеси газа и частиц, D_{CJ} — скорость детонации Чепмена — Жуге) от массовой концентрации инертных компонентов ξ_2 для частиц песка диаметром 1, 10 и 100 мкм, а также для аргона. Точки внизу графика соответствуют концентрационным (по массовой доле частиц) пределам детонации. Для частиц диаметром 10 и 100 мкм они равны 0.33 и 0.88 соответственно, что соответствует объемным концентрациям, приведенным выше.

Под подавлением детонации в реагирующей смеси газов понимается ряд мер, приводящий к трансформации ДВ в волновой комплекс, состоящий из затухающей замороженной УВ и отстающего фронта воспламенения/горения, который не способен инициировать детонацию смеси.

При проведении численных расчетов применялся конечно-разностный метод типа универсального алгоритма для аппроксимации по времени. Для пространственной аппроксимации использована TVD-схема третьего порядка точности с расщеплением вектора потоков по Ван Лиру. Детали алгоритма и данные тестирования используемого численного метода подробно изложены в [12, 13].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Однородная по пространству объемная концентрация частиц в облаке

Первоначально расчеты были проведены при однородной по пространству объемной концентрации частиц в облаке $m_2 = 2 \cdot 10^{-3}$ и диаметре частиц $d = 10^{-4}$ м в первом случае и $m_2 = 2 \cdot 10^{-4}$, $d = 10^{-5}$ м — во втором. Длина облака в последующих вариантах расчетов менялась в пределах $L = 2 \div 50$ см.

Динамика процессов инициирования и подавления детонации. После разрыва мембраны, разделяющей КВД и КНД, по КНД распространяется УВ, трансформирующаяся в ДВ, поскольку параметры потока за УВ выше критических параметров инициирования. По КВД, из которой происходит истечение кислорода в КНД, распространяется волна разрежения (рис. 3, а). На рисунке в точке $x = 0.45$ м находится фронт ДВ, за ним до плоскости Чепмена — Жуге идет зона химической реакции, в которой протекают реакции воспламенения и горения водорода.

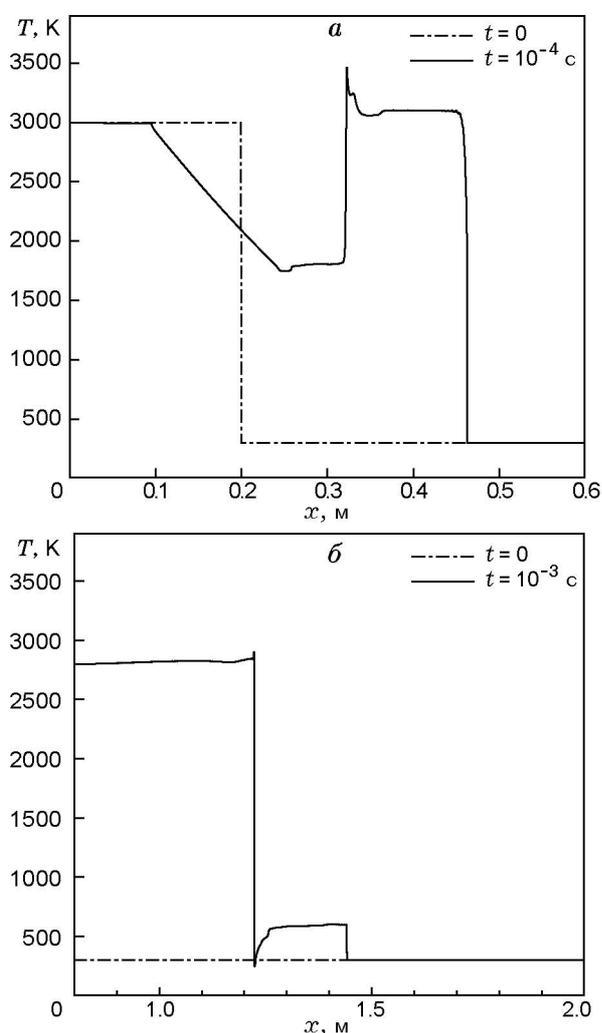


Рис. 3. Иницирование ДВ перед облаком частиц в ударной трубе (а). Распространение комплекса слившихся замороженной УВ и ВВГ, выталкивание горячих продуктов реакции из облака частиц. Критическая длина облака (б)

По завершении реакций температура продуктов составляет 3 100 К, что соответствует температуре Чепмена — Жуге. В точке $x = 0.3$ м находится контактный разрыв, разделяющий продукты реакции и кислород, истекающий из КВД.

После входа ДВ в облако частиц и прохождении ею некоторого расстояния (оно будет определено ниже) она распадается на замороженную УВ и отстающую от нее ВВГ. Последняя ослабевает в облаке частиц. В дальнейшем после выхода замороженной УВ и ВВГ из облака частиц возможно развитие процесса по одному из сценариев: либо вторичное инициро-

вание ДВ, либо распространение комплекса, состоящего из замороженной УВ и догнавшей ее УВ, которая осталась после гашения ВВГ. В последнем случае химическая реакция за фронтом не наблюдается, т. е. произошло подавление детонации. Кроме того, как уже было сказано, из КВД происходит истечение кислорода, и по КНД в облаке распространяется контактный разрыв, который при прохождении облака выталкивает из него горячие продукты реакции (рис. 3, б).

Малые (докритические) размеры облака. При малых размерах облака $\bar{L} = L/L_* = 0.067 \div 0.134$ (критический размер облака L_* будет определен ниже) распада ДВ внутри облака, когда фронт воспламенения/горения отстает от замороженной УВ, еще не наблюдается. Однако не наблюдается и характерного треугольного профиля давления после входа ДВ в облако частиц, т. е. при таких размерах облака только начинается разрушение структуры ДВ. На длине $\bar{L} > 0.134$ происходит формирование структуры в виде замороженной УВ и отстающего от нее фронта воспламенения/горения. В фильтре длиной $\bar{L} = 0.134$ скорость замороженной УВ перед выходом в смесь H_2-O_2 составляет 1 140 м/с, что соответствует дефициту скорости детонации $\eta = 0.42$. После выхода из фильтра формируется слабо пересжатая ДВ, движущаяся со скоростью 2 933 м/с, $\eta = 1.07$. Этот режим является нестационарным и в дальнейшем переходит в режим Чепмена — Жуге, которому соответствует скорость ДВ, равная 2 735 м/с.

Промежуточные (докритические) размеры облака. При длине облака $\bar{L} > 0.134$ происходит распад ДВ на замороженную УВ и отстающий фронт воспламенения/горения. Это означает, что $\bar{L} = 0.134$ является предкритическим значением длины облака, которое приводит к расщеплению детонационного фронта. Чтобы понять механизм распада ДВ, рассмотрим облако частиц длиной $\bar{L} = 0.33$ и диаметром 100 мкм. При таком размере фильтра полного гашения ВВГ не происходит, однако отчетливо виден распад ДВ на замороженную УВ и отстающий фронт воспламенения/горения (рис. 4). Следует отметить, что и ВВГ в облаке распространяется нестационарно, ее скорость уменьшается. Перед выходом замороженной УВ из облака частиц расстояние от ее переднего фронта до ВВГ для данного случая составляет 2.6 см, скорость ВВГ в этом фильтре падает до 320 м/с.

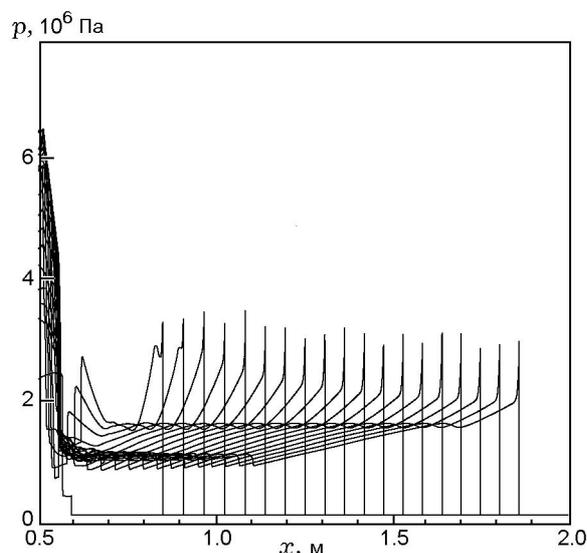


Рис. 4. Распад ДВ на замороженную УВ и ВВГ в облаке частиц, вторичное инициирование ДВ за облаком (фильтром) частиц и выход ДВ на режим Чепмена — Жуге ($\bar{L} = 0.33$, $d = 100$ мкм). Докритический режим

Скорость замороженной УВ в фильтре составляет 1040 м/с. После ее выхода из облака не происходит воспламенения за ее фронтом, так как температура газа ниже критической температуры воспламенения и составляет 500 К. Однако после выхода ВВГ из облака частиц скорость ВВГ быстро увеличивается и она догоняет замороженную УВ. В результате резко возрастают давление и температура и формируется ДВ, которая разгоняется до скорости 2982 м/с, $\eta = 1.09$. Данный режим является, как и в случае прохождения детонационной волной малых размеров облака, описанном выше, слабо пересечатым и в дальнейшем переходит в режим Чепмена — Жуге (рис. 4).

Итак, при изменении размера облака от $\bar{L} = 0.33$ до $\bar{L} = 1$ подавления детонации не наблюдается, после слияния ВВГ с замороженной УВ за облаком частиц формируется ДВ.

Большие (критические и сверхкритические) размеры облака. Для размеров облака, больших критического ($\bar{L} = 1.66$), волна горения, двигающаяся за фронтом замороженной УВ, также распространяется нестационарно, стационарных режимов распространения не наблюдается. На рис. 5 для первого случая приведено изменение амплитуды волны горения с расстоянием, т. е. давление за ее фронтом. Как видно, оно уменьшается с расстоянием. Таким об-

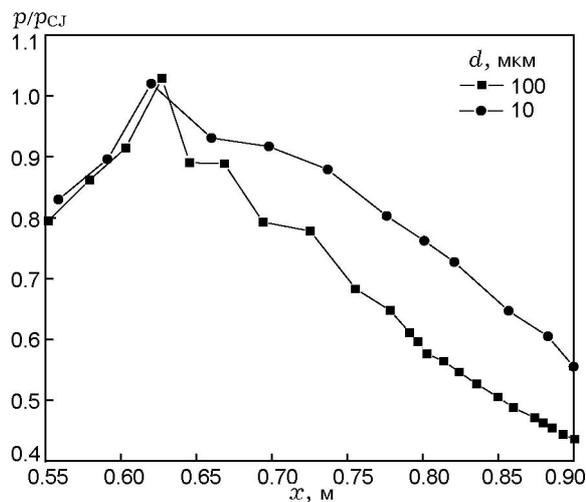


Рис. 5. Амплитуда фронта волны воспламенения/горения ($\bar{L} = 1.66$, $d = 100$ мкм). Сверхкритический режим

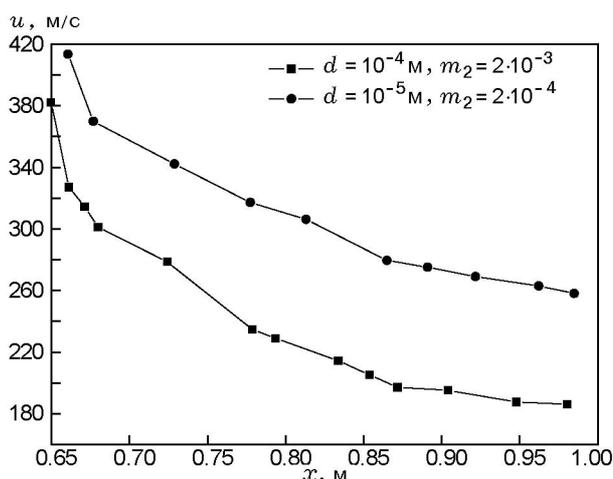


Рис. 6. Нестационарное распространения волны воспламенения/горения ($\bar{L} = 1.66$, $d = 10$, 100 мкм). Сверхкритический режим

разом, происходит ослабление ВВГ в облаке. Кроме того, на рис. 6 показано распределение скорости ВВГ в облаке частиц для обоих случаев (для $d = 10$ и 100 мкм). В облаке частиц размером 10 мкм ВВГ движется с большей скоростью, чем в фильтре с размером частиц 100 мкм, поскольку масса облака 100-микронных частиц больше ($\xi_2 = 0.88$), чем 10-микронных ($\xi_2 = 0.33$). Следовательно, они отбирают больше тепла. Видно, что после распада ДВ на замороженную УВ и фронт воспламенения/горения скорость последнего уменьшается с 380 до 200 м/с в первом случае и до 260 м/с

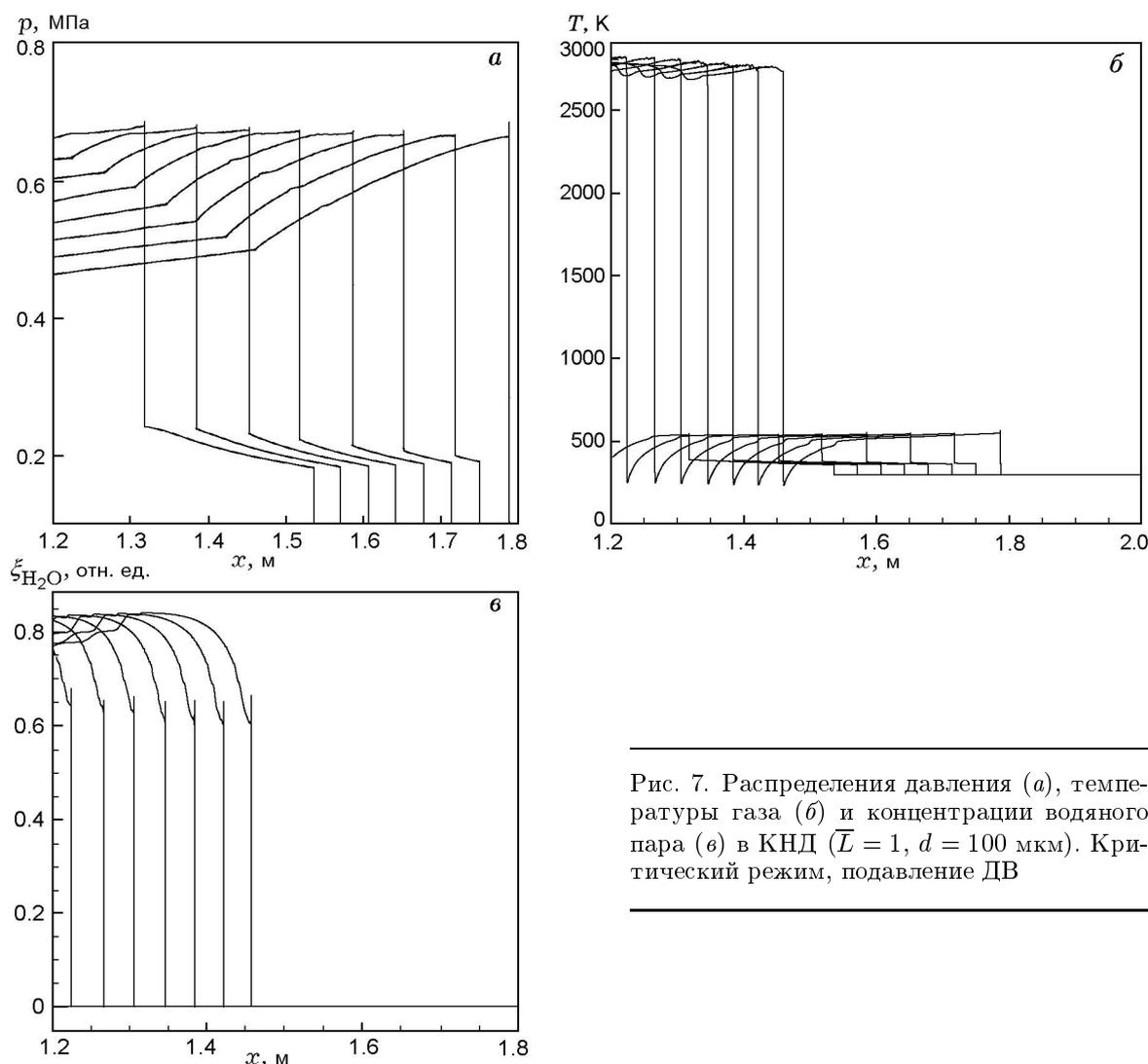


Рис. 7. Распределения давления (а), температуры газа (б) и концентрации водяного пара (в) в КНД ($\bar{L} = 1$, $d = 100$ мкм). Критический режим, подавление ДВ

во втором, а затем ВВГ выходит из облака частиц.

Как уже было сказано, облака размером $\bar{L} \leq 1$ не разрушают ДВ. При $\bar{L} = 0.66$ после слияния ВВГ и замороженной УВ формируется ДВ, однако при размере облака 30 см наблюдается подавление ДВ для обеих фракций частиц. После выхода волны горения из облака частиц инициирование ДВ не наблюдается (рис. 7,а). Поэтому в качестве критического приемлемое значение $L_* = 30$ см.

На рис. 7,а приведено распределение давления в КНД после выхода комплекса, состоящего из замороженной УВ и ударной волны, оставшейся после гашения ВВГ, из облака частиц диаметром 100 мкм. Видно, что ампли-

туда УВ постепенно уменьшается. Скорость ВВГ после выхода из облака частиц составляет 1168.6 м/с. На рис. 7,б показано распределение температуры газа в ударной трубе. За фронтом УВ температура равна 500 К, что гораздо ниже критической температуры воспламенения $T_* = 850$ К. Позади фронта УВ наблюдается область с высокой температурой газа $T = 2750$ К. Понять причины образования такой области помогает представленное на рис. 7,в распределение концентрации водяного пара в КНД в те же моменты времени, что и у профилей давления и температуры. Видно, что концентрации водяного пара в высокотемпературной области позади УВ большие — $\xi_{H_2O} = 0.73$. Как уже говорилось ранее, это свя-

зано с тем, что контактный разрыв выталкивает продукты реакции из облака частиц.

Для частиц размером 10 мкм параметры за УВ чуть выше ($p \approx 7.5$ атм, $T = 540$ К), но также не превышают критические значения для инициирования ДВ. Однако после отражения УВ от стенки происходит реиницирование ДВ, скорость которой в лабораторной системе координат $D = 2082$ м/с, в системе координат набегающего потока $D_* = 2800$ м/с, а пересжатие $\eta = 1.02$.

Неоднородная по пространству объемная концентрация частиц в облаке

Представляется интересным сравнить эффективность подавления ДВ двумя типами облаков — с однородной и неоднородной по пространству объемной концентрацией частиц.

Сверхкритическая нарастающая по длине облака концентрация частиц. Зададим объемную концентрацию частиц в облаке меняющейся по линейному закону:

$$m_2 = m_{20} + \frac{m_{2k} - m_{20}}{x_k - x_0}(x - x_0),$$

где $m_{20} = m_2^* = 2 \cdot 10^{-3}$ — критическая объемная концентрация частиц, а $m_{2k} = 10^{-2}$ — объемная концентрация частиц в конце облака, диаметр частиц $d = 100$ мкм. То есть рассмотрим облако с нарастанием концентрации частиц к его концу. Будем рассматривать критические ($\bar{L} = 1$) и предкритические ($\bar{L} = 0.66$) размеры облака.

Для облака размером $\bar{L} = 0.66$, так же как и в случае постоянной объемной концентрации частиц, наблюдается повторное инициирование слабо пересжатой ДВ, $D = 2830$ м/с, $\eta = 1.035$ (рис. 8, а). В случае однородной по пространству объемной концентрации частиц скорость ДВ после образования составляла 2857 м/с, $\eta = 1.045$. Скорость ВВГ перед выходом из облака с переменной объемной концентрацией была 289 м/с, а в облаке с неоднородной по пространству объемной концентрацией — 318.6 м/с. Таким образом, облако с неоднородной по пространству объемной концентрацией частиц лучше гасит ВВГ, но эффективность гашения невелика, так как при этом все равно происходит дефлаграционно-детонационный переход, т. е. даже из такой ослабленной волны реиницируется ДВ.

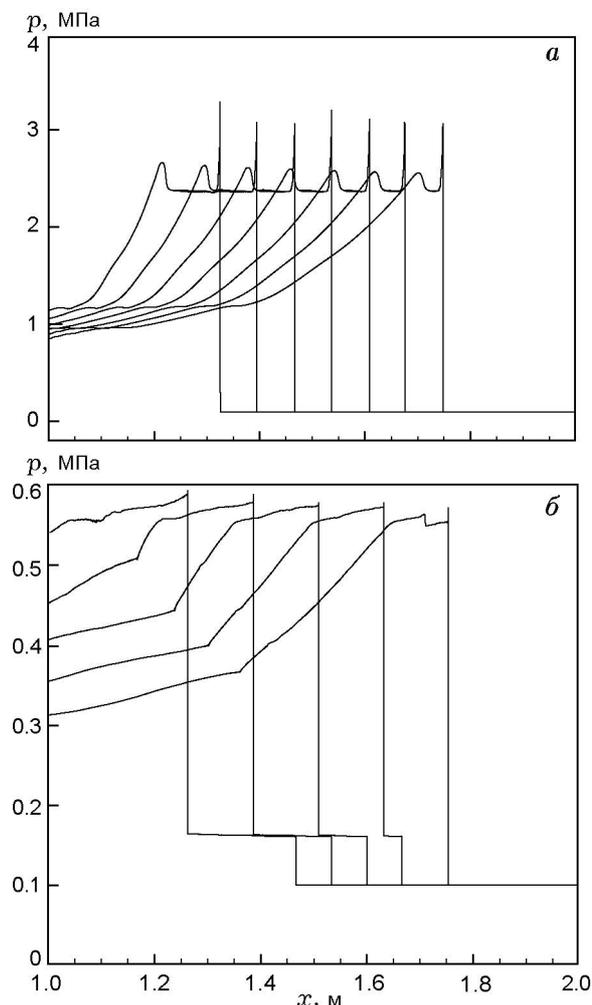


Рис. 8. Формирование ДВ после прохождения облака частиц ($\bar{L} = 0.66$, $d = 100$ мкм). Докритический режим (а). Распределение давления в КНД ($\bar{L} = 1$, $d = 100$ мкм). Критический режим, подавление ДВ (б)

Сравним эффективность подавления ДВ облаком критического размера ($\bar{L} = 1$) с однородной и неоднородной по пространству объемной концентрацией. В обоих случаях наблюдается гашение ДВ. Однако параметры за волной, образующейся после слияния замороженной УВ и УВ, ниже в случае переменной объемной концентрации. Например, давление за фронтом составляет $p = 5.5$ атм (рис. 8, б) против $p = 6.5$ атм в случае постоянной объемной концентрации частиц. При этом температура также не превышает критическую температуру воспламенения водорода и составляет 500 К.

Таким образом, увеличение объемной концентрации на задней кромке облака по сравнению с концентрацией на передней кромке не дает заметного увеличения эффективности гашения ДВ, т. е. длина облака частиц L_* , необходимая для гашения ДВ, в обоих случаях примерно одинакова.

Уменьшающаяся по длине облака концентрация частиц. Также представляется интересным изучить влияние уменьшения объемной концентрации частиц в облаке фиксированной длины, равной критическому значению. Пусть предельная концентрация на передней кромке облака составляет $m_2^* = 2 \cdot 10^{-3}$. Как уже говорилось, при постоянной объемной концентрации частиц предельным является размер облака, находящийся в диапазоне длин $20 \div 30$ см. И при $\bar{L} = 1$ и объемной концентрации, уменьшающейся от критического значения до некоторого меньшего, ожидается, что детонация может быть подавлена. Тем не менее попытаемся определить критический градиент в распределении объемной концентрации частиц, при котором, может быть, все-таки возможно повторное инициирование ДВ.

В данном случае будем менять объемную концентрацию частиц в конце облака от значения $m_{2k} = 10^{-3}$ до 10^{-4} , каждый раз уменьшая ее в два раза.

Проведенные расчеты показали, что уменьшение объемной концентрации в конце облака до значения $m_{2k} = 10^{-4}$ приводит к гашению детонации во всех рассматриваемых случаях, при критической длине облака. Хотя объемная концентрация частиц в облаке уменьшается, скорость ВВГ не возрастает. ВВГ движется с дозвуковой скоростью по области с уменьшающейся m_2 . То есть можно провести аналогию со сверхзвуковым соплом. В данном случае роль площади поперечного сечения сопла будет играть объемная концентрация газовой смеси m_1 , которую можно выразить через объемную концентрацию частиц соотношением $m_1 = 1 - m_2$. Тогда равенство, связывающее скорость потока и площадь поперечного сечения канала, примет вид

$$\left(\frac{u^2}{c_f^2} - 1\right) \frac{du}{u} = \frac{dm_1}{m_1} = -\frac{dm_2}{1 - m_2}.$$

Таким образом, имеем дозвуковое течение в расширяющемся канале, но с теплоподводом за счет химической реакции и трением газа

в облаке. По-видимому, теплоподвод и трение в данном случае не являются определяющими, поэтому дозвуковой поток в расширяющейся области тормозится (геометрическое воздействие).

Отметим, что в облаке с объемной концентрацией, меняющейся от критической $2 \cdot 10^{-3}$ до конечной 10^{-4} , скорость ВВГ уменьшилась до 462 м/с. Как и следовало ожидать, в данном случае давление за фронтом образующейся УВ после слияния ВВГ и замороженной УВ выше, чем в случае постоянной объемной концентрации. Для случая, когда $m_{2k} = 10^{-4}$, оно составляет $p = 8$ атм. Однако температура за фронтом ниже критической — 690 К, поэтому повторного инициирования детонации не происходит. То есть детонация эффективно подавляется облаком, в котором объемная концентрация частиц уменьшается вдоль него от критической до некоторой меньшей.

Концентрация на кромке облака, меньшая критической, при росте m_2 . Теперь зададим объемную концентрацию частиц, линейно меняющуюся от значения m_{20} на передней кромке облака, которое меньше критического, до значения $m_{2k} = m_2^* = 2 \cdot 10^{-3}$. Будем увеличивать m_{20} от 10^{-4} до 10^{-3} . Данные значения лежат ниже концентрационных пределов детонации, т. е. детонация в облаке с такой концентрацией может существовать. На рис. 9 показаны ослабление ДВ в начале облака частиц и распад ДВ на замороженную УВ и ВВГ на примере распределения давления газовой смеси. В этом

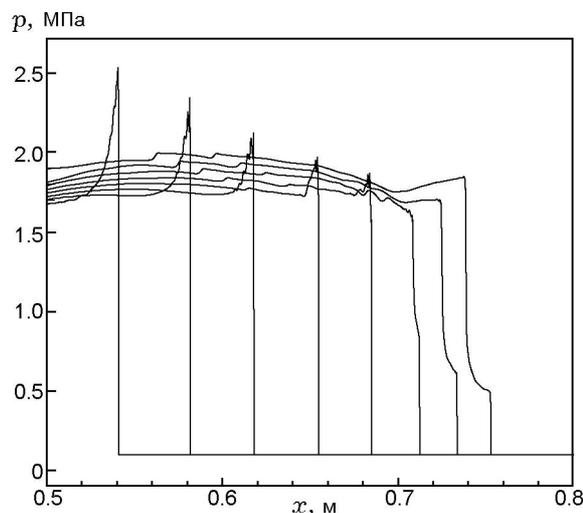


Рис. 9. Распределение давления в КНД ($\bar{L} = 1$, $d = 100$ мкм). Ослабление и распад ДВ

облаке объемная концентрация увеличивается от $m_{20} = 10^{-4}$ до критического значения m_2^* . Видно, что первые 20 см облака детонационная волна все еще существует, но только ослабленная. По аналогии с описанным выше мы имеем сверхзвуковое течение в сужающемся канале, в котором происходит торможение потока. При приближении ДВ к области с критической концентрацией наблюдается ее распад. Он начинается на расстоянии около 10 см от конца облака. В данной точке объемная концентрация равна $1.37 \cdot 10^{-3}$. Но, как уже было показано ранее, облака длиной 10 см недостаточно для гашения ДВ, и после прохождения облака реализуется вторичное инициирование ДВ. При повышении концентрации частиц до $m_{20} = 10^{-3}$ также наблюдается инициирование ДВ.

На рис. 10 показана зависимость расстояния между точкой, в которой объемная концентрация частиц достигает максимума, и точкой, в которой ДВ распадается на замороженную УВ и ВВГ, от градиента объемной концентрации частиц в облаке. Видно, что в случае возрастающей объемной концентрации частиц чем меньше ее градиент, тем раньше наступает распад. Значение m_2 в этих точках лежит в пределах $(1.35 \div 1.6) \cdot 10^{-3}$.

Кроме того, на рис. 10 приведены точки для предыдущего течения с уменьшающейся вдоль облака концентрацией частиц. Видно, что градиент m_2 практически не влияет на координату начала распада ДВ. При всех рассматриваемых градиентах концентрации рас-

пад происходит на расстоянии $4 \div 5$ см от начала облака, где объемная концентрация максимальна. В свою очередь, масса облака частиц для всех рассматриваемых случаев изменения m_2 варьирует от 0.75 до 1.4 кг. Таким образом, определяющим параметром является не столько масса частиц и градиент их объемной концентрации, сколько длина облака, на котором происходит гашение ВВГ.

Немонотонное распределение концентрации в облаке частиц. Интересным представляется изучить вариант детонационного течения в облаке, в котором объемная концентрация частиц сначала возрастает от значения m_{20} до критического m_2^* , а затем уменьшается до $m_{2k} = m_{20}$. Рассмотрим два вида распределения объемной концентрации частиц в облаке: линейно меняющаяся концентрация и меняющаяся в соответствии с распределением Гаусса. Последнее распределение в нашем случае имеет вид

$$m_2 = m_2^* \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{\sigma}\right),$$

где x_0 — центр облака, σ — параметр, определяющий длину облака. В первом случае зададим $m_{2k} = m_{20} = 10^{-4}$, во втором границами облака будем считать точки, в которых объемная концентрация равна $2 \cdot 10^{-5}$.

В случае линейно меняющейся объемной концентрации частиц подавление ДВ начинается при размере облака от 40 см, в случае распределения Гаусса эта длина равна 60 см. В свою очередь, расстояние, на котором происходит гашение ВВГ, составляло 25 см для линейного распределения и 35 см для распределения Гаусса. Это отличие вызвано тем, что во втором случае объемная концентрация частиц возрастает в начале облака и уменьшается в его конце быстрее, чем в первом случае. То есть ВВГ в последнем случае 30 % расстояния движется по области с малыми концентрациями частиц, которые неэффективно гасят ВВГ.

ВЫВОДЫ

- В задаче о подавлении детонации конечноразмерным облаком (фильтром) инертных частиц с постоянной объемной концентрацией, равной критической для бесконечного облака, определена минимальная длина облака (фильтра) частиц, такая что после выхода комплекса «замороженная ударная волна + волна воспламенения и горения» из фильтра не наблюдается дефлаграционно-детонационного перехода.

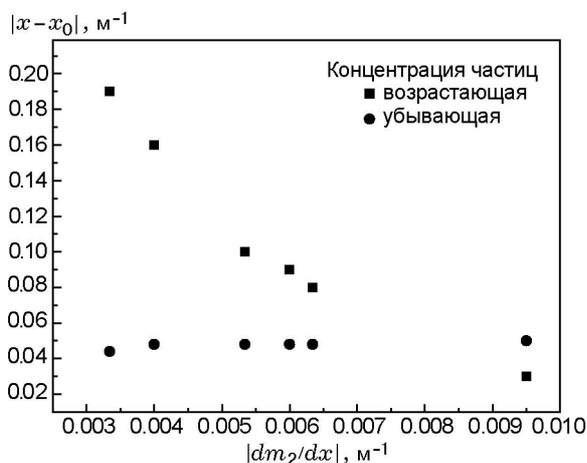


Рис. 10. Точки распада ДВ на замороженную УВ и ВВГ в зависимости от градиента объемной концентрации частиц ($L = 1, d = 100$ мкм)

• При исследовании влияния распределения объемной концентрации по длине облака (фильтра) на эффективность подавления детонации, установлено следующее:

— увеличение объемной концентрации частиц от критической до некоторой большей не приводит к более эффективному гашению ДВ. Кроме того, определенная критическая длина облака (фильтра) является в некотором смысле оптимальной, так как при изменении вида распределения критическая длина облака (фильтра) меняется незначительно;

— уменьшение объемной концентрации частиц от критической до некоторой меньшей приводит к менее эффективному гашению ДВ по сравнению с вариантом постоянной предельной концентрации. Предположительно это обусловлено влиянием частиц на газодинамическую картину течения (геометрическое воздействие);

— при немономном распределении объемной концентрации частиц определяющим параметром в процессе подавления детонации является не объемная концентрация частиц и их масса, а длина, на которой происходит гашение волны воспламенения/горения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Laffitte P., Bouchet R. Suppression of explosion waves in gaseous mixtures by means of fine powders // Proc. 7th Intern. Symp. on Combustion, 1958.
2. Wolinski M., Wolanski P. Gaseous detonation processes in presence of inert particles // Arch. Combust. — 1987. — V. 7, N 3/4. — P. 353–370.
3. Wolanski P., Liu J. C., Kaufman C. W., Nicholls J. A., Sichel M. The effect of inert particles on methan-air detonations // Arch. Combust. — 1988. — V. 8, N 1. — P. 15–32.
4. Борисов А. А., Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Когарко С. М. Влияние твердых инертных частиц на детонацию горючей газовой смеси // Физика горения и взрыва. — 1975. — Т. 11, № 6. — С. 909–914.
5. Казаков Ю. В., Федоров А. В., Фомин В. М. Детонационная динамика газовзвесей. — Новосибирск, 1987. — (Препр. / АН СССР. Сиб. отд-ние. ИТПМ; № 23-87.)
6. Казаков Ю. В., Федоров А. В., Фомин В. М. Режимы нормальной детонации в релаксирующих средах // Физика горения и взрыва. — 1989. — Т. 25, № 1. С. 119–127.
7. Казаков Ю. В., Миронов Ю. В., Федоров А. В. Расчет детонации газовой смеси при наличии инертных твердых частиц // Моделирование в механике. — 1991. — Т. 5 (22), № 3.
8. Fedorov A. V., Fomin V. M. Detonation of the gas mixtures with inert solid particles // IUTAM Symp. on Combustion in Supersonic Flows, 1997. — Kluwer Academic Publ., 1997. — P. 147–191.
9. Papalexandris M. V. Numerical simulation of detonations in mixtures of gases and solid particles // J. Fluid Mech. — 2004. — V. 507. — P. 95–142.
10. Фомин П. А., Чен Дж.-Р. Влияние химически инертных частиц на параметры и подавление детонации в газах // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45, № 3. — С. 77–88.
11. 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.
12. Бедарев И. А., Федоров А. В. Тестирование метода адаптивных сеток на расчетах одномерных детонационных волн // Вычислит. технологии. — 2009. — Т. 14, № 3. — С. 14–24.
13. Бедарев И. А., Федоров А. В. Сравнительный анализ трех математических моделей воспламенения водорода // Физика горения и взрыва. — 2006. — Т. 42, № 1. — С. 26–33.

Поступила в редакцию 18/V 2010 г.