

## 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 прошел 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-

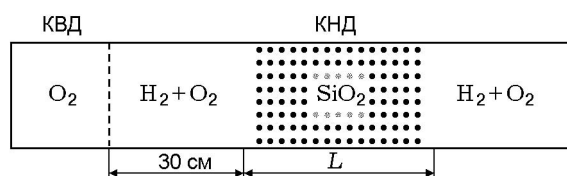


Рис. 1. Постановка задачи

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-

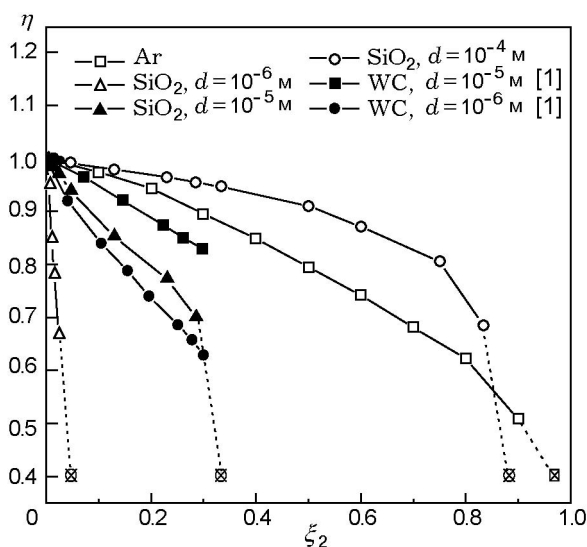


Рис. 2. Зависимость дефицита скорости детонации от массовой концентрации инертных компонентов. Концентрационные по массовой доле частиц пределы детонации

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  $\xi_2$  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.

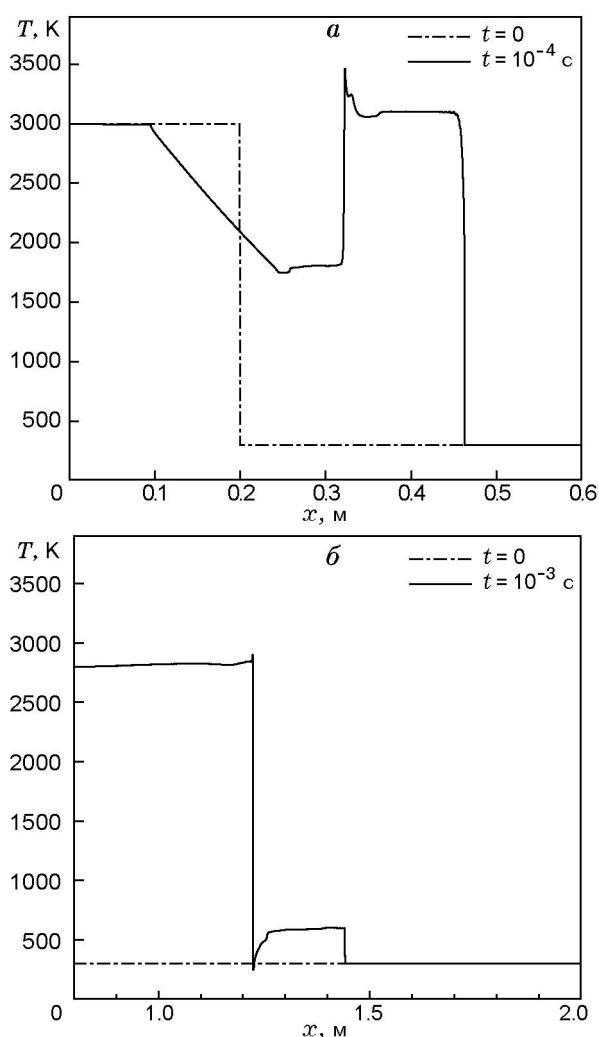


Рис. 3. Иницирование ДВ перед облаком частиц в ударной трубе (а). Распространение комплекса слившихся замороженной УВ и ВВГ, выталкивание горячих продуктов реакции из облака частиц. Критическая длина облака (б)

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.

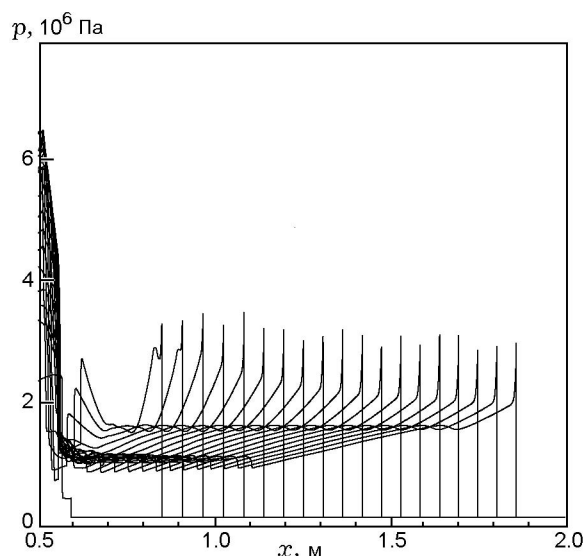


Рис. 4. Распад ДВ на замороженную УВ и ВВГ в облаке частиц, вторичное инициирование ДВ за облаком (фильтром) частиц и выход ДВ на режим Чепмена — Жуге ( $\bar{L} = 0.33$ ,  $d = 100$  мкм). Докритический режим

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-

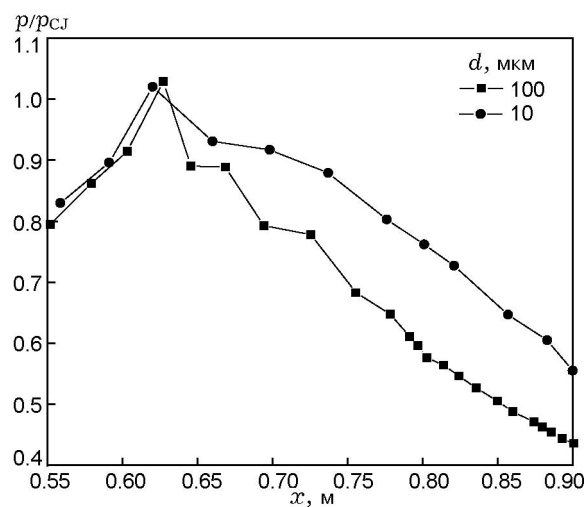


Рис. 5. Амплитуда фронта волны воспламенения/горения ( $\bar{L} = 1.66$ ,  $d = 100$  мкм). Сверхкритический режим

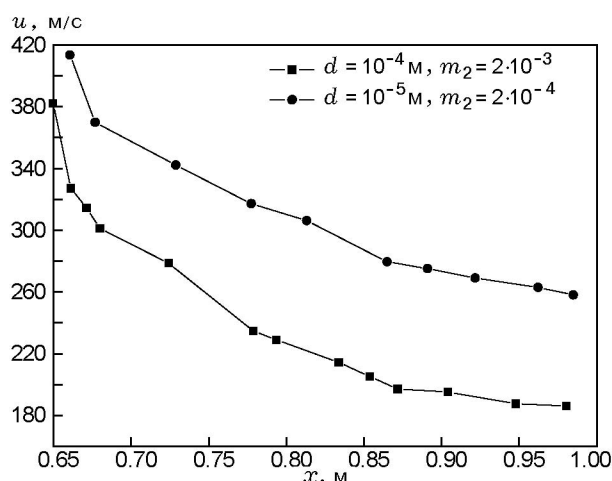


Рис. 6. Нестационарное распространения волны воспламенения/горения ( $\bar{L} = 1.66$ ,  $d = 10$ , 100 мкм). Сверхкритический режим

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

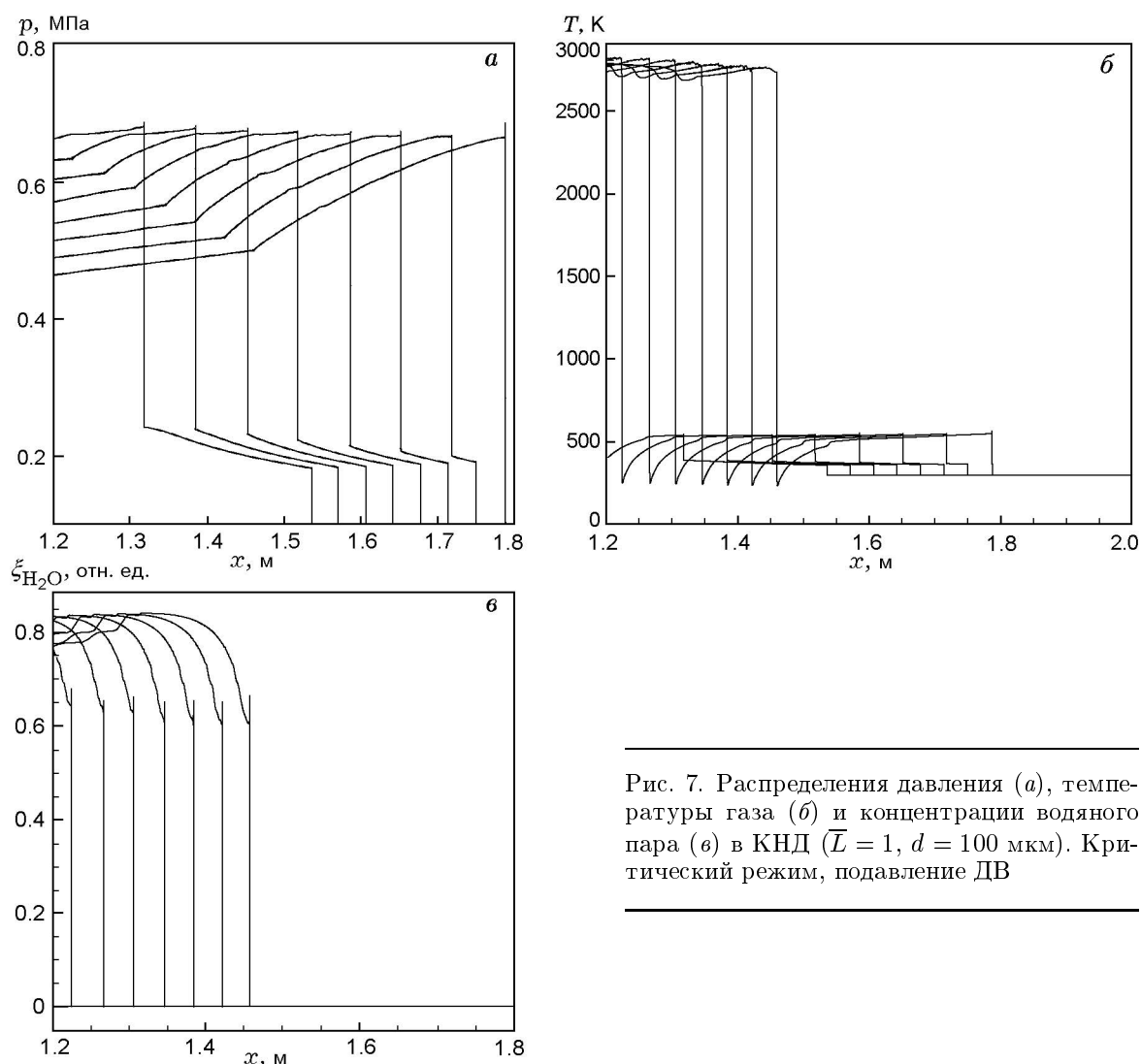


Рис. 7. Распределения давления (*a*), температуры газа (*б*) и концентрации водяного пара (*в*) в КНД ( $\bar{L} = 1$ ,  $d = 100$  мкм). Критический режим, подавление ДВ

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, *a*). Поэтому в качестве критического приемлемое значение  $L_* = 30$  см.

На рис. 7, *a* 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 —  $\xi_{\text{H}_2\text{O}} = 0.73$ . 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.

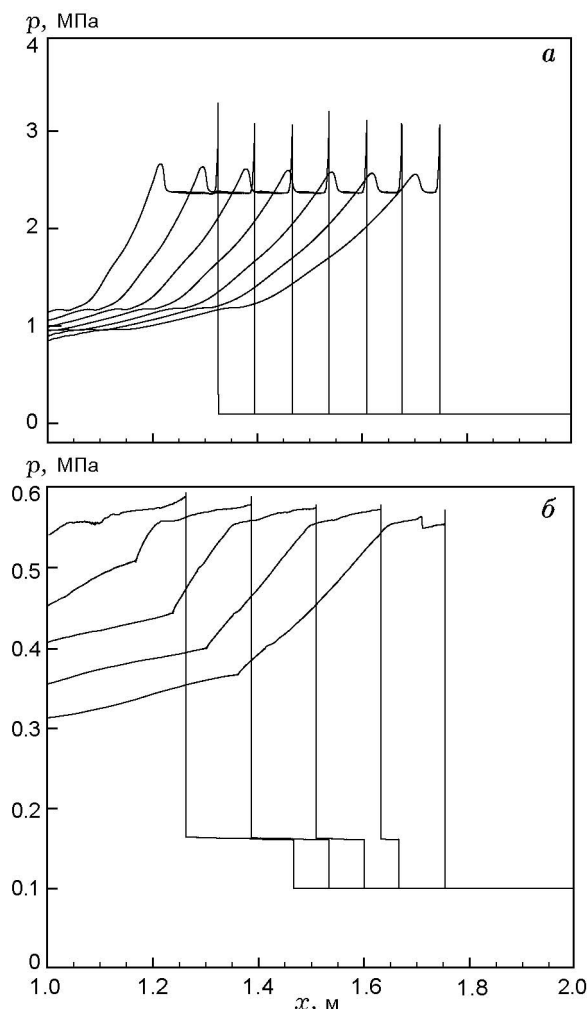


Рис. 8. Формирование ДВ после прохождения облака частиц ( $\bar{L} = 0.66$ ,  $d = 100$  мкм). Докритический режим (а). Распределение давления в КНД ( $\bar{L} = 1$ ,  $d = 100$  мкм). Критический режим, подавление ДВ (б)

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

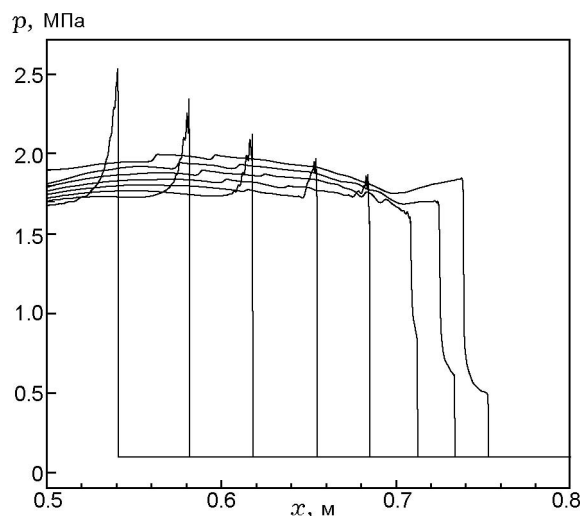


Рис. 9. Распределение давления в КНД ( $\bar{L} = 1$ ,  $d = 100$  мкм). Ослабление и распад ДВ

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,  $\sigma$  — 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.

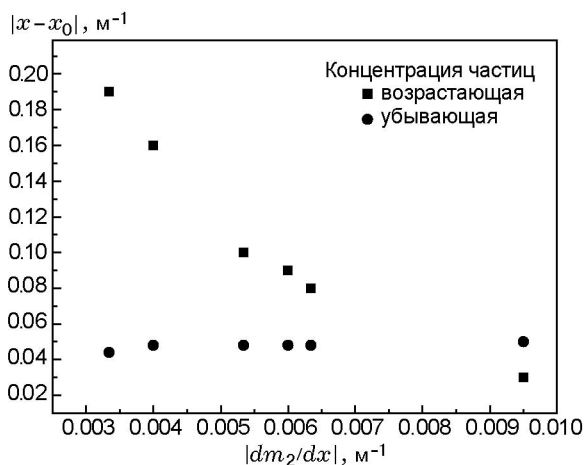


Рис. 10. Точки распада ДВ на замороженную УВ и ВВГ в зависимости от градиента объемной концентрации частиц ( $L = 1, d = 100$  мкм)



• 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.