Math-Net.Ru
Общероссийский математический портал

С. А. Лепихин, М. Н. Галимзянов, И. К. Гималтдинов, Инициирование детонационных волн в каналах переменного сечения, заполненных жидкостью с пузырьками горючего газа,
ТВТ, 2010, том 48, выпуск 2, 234–240

https://www.mathnet.ru/tvt714

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
https://www.mathnet.ru/rus/agreement

Параметры загрузки:
IP: 18.97.9.168
17 декабря 2025 г., 13:03:09

ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР, 2010, том 48, № 2, с. 234–240

УДК 532.595.2

ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В КАНАЛАХ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ, ЗАПОЛНЕННЫХ ЖИДКОСТЬЮ С ПУЗЫРЬКАМИ ГОРЮЧЕГО ГАЗА

© 2010 г. С. А. Лепихин[1], М. Н. Галимзянов[2], И. К. Гималтдинов[3]

[1]Бирская государственная социально-педагогическая академия

[2]Институт механики Уфимского научного центра РАН

[3]Стерлитамакская государственная педагогическая академия

Поступила в редакцию 05.11.2008 г.

В работе исследованы особенности инициирования детонационных волн в химически активных пузырьковых средах, находящихся в каналах переменного сечения. Выявлено, что в зависимости от начального объемного содержания горючей смеси протекание детонации в сужающихся каналах возможно с возникновением одного или двух детонационных солитонов. В каналах с закрытым дном показана возможность возникновения устойчивой детонационной волны при отражении от дна канала. Также показана возможность инициирования детонации при отражении волны от области "чистой" жидкости. В зависимости от амплитуды инициирующей волны и начального объемного содержания пузырьков построена карта решений, иллюстрирующая режимы протекания детонации в рассмотренных каналах.

ВВЕДЕНИЕ

При воздействии на пузырьковую жидкость с горючей смесью газов (вода с пузырьками гремучего газа или смесью углеводородов с кислородом) импульсом давления амплитудой 10–20 атм в ней может возникать детонационная волна с амплитудой, доходящей до 100 атм [1–6]. С учетом эффектов, связанных с влиянием геометрической формы каналов на амплитуду распространяющихся в них волн [7, 8], представляется возможным провести инициирование детонации в каналах переменного сечения импульсами меньшей амплитуды.

Данное обстоятельство должно быть учтено при анализе возможных аварийных ситуаций из-за толчков и ударов при хранении и транспортировке воспламеняющихся жидких веществ в емкостях различной геометрической формы и размеров, в которых при заполнении может образоваться большое количество пузырьков, содержащих смесь воздуха с парами горючего, способную воспламеняться при адиабатическом сжатии. Оно, несомненно, представляет интерес для усиления ударов при технологических процессах, связанных с воздействием высокого давления, к примеру аналогичных [9].

В данной работе в квазиодномерном приближении рассматриваются особенности возбуждения и распространения детонационных волн в каналах переменного сечения при воздействии на пузырьковую жидкость импульса давления типа "ступенька", амплитуда которого не способна инициировать детонацию на входе каналов.

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

При описании рассматриваемых процессов будем полагать, что в каждом элементарном объеме все пузырьки сферические и одного радиуса, вязкость и теплопроводность существенны лишь в процессе межфазного взаимодействия, в частности при пульсации пузырьков, отсутствует дробление и слипание пузырьков.

На основе вышеприведенных допущений примем систему макроскопических уравнений масс, числа пузырьков, импульсов и давления в пузырьках в односкоростном приближении [10]

$$\frac{\partial(\rho_i S)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho_i \mathbf{v} S)}{\partial x}=0 \quad (i=l,g),$$

$$\frac{\partial(nS)}{\partial t}+\frac{\partial(n\mathbf{v}S)}{\partial x}=0,$$

$$\frac{\partial(\rho\mathbf{v}S)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\mathbf{v}^2S)}{\partial x}=-S\frac{\partial p_l}{\partial x},$$

$$\frac{dp_g}{dt}=-\frac{3\gamma p_g}{a}\mathbf{w}-\frac{3(\gamma-1)}{a}q, \quad \frac{da}{dt}=\mathbf{w},$$

$$\alpha_l+\alpha_g=1, \quad \alpha_g=\frac{4}{3}\pi a^3 n, \quad \rho_i=\rho_i^0\alpha_i, \quad \rho=\rho_l+\rho_g,$$

где $S = S(x)$ – площадь поперечного сечения канала, a – радиус пузырьков, γ – показатель адиабаты для газа, $\mathbf{v}$ – скорость, p_i – давление фаз, ρ_i^0 – истинная плотность фаз, α_i – объемное содержание фаз, q – интенсивность теплообмена, n – число пузырьков в единице объема. Нижними индексами $i = l, g$ здесь отмечены параметры соответственно жидкой и газовой фаз.

При описании радиального движения в соответствии с уточнением, предложенным в [11], будем полагать, что $\mathbf{w} = \mathbf{w}_R + \mathbf{w}_A$, где $\mathbf{w}_R$ описывается уравнением Рэлея–Ламба, а $\mathbf{w}_A$ определяется из решения задачи о сферической разгрузке на сфере радиусом a в несущей жидкости в акустическом приближении

$$a\frac{d\mathbf{w}_R}{dt} + \frac{3}{2}\mathbf{w}_R^2 + 4\nu_l\frac{\mathbf{w}_R}{a} = \frac{p_g - p_l}{\rho_l^0},$$

$$\mathbf{w}_A = \frac{p_g - p_l}{\rho_l^0 C_l \alpha_g^{1/3}},$$

где ν_l – вязкость жидкости, C_l – скорость звука в жидкости.

Будем полагать, что жидкость является акустически сжимаемой, а газ калорически совершенным

$$p_l = p_0 + C_l^2\left(\rho_l^0 - \rho_{l0}^0\right), \quad p_g = \rho_g^0 R T_g,$$

где R – газовая постоянная. Здесь и в дальнейшем нижним индексом 0 снабжены параметры, относящиеся к начальному невозмущенному состоянию.

Тепловой поток q задается приближенным конечным соотношением [10]

$$q = \mathrm{Nu}\lambda_g\frac{T_g - T_0}{2a}, \quad \mathrm{Nu} = \begin{cases}\sqrt{\mathrm{Pe}}, & \mathrm{Pe} \geq 100,\\ 10, & \mathrm{Pe} < 100,\end{cases}$$

$$\mathrm{Pe} = 12(\gamma - 1)\frac{T_0}{|T_0 - T_g|}\frac{a|w|}{\nu_g^{(T)}}, \quad \nu_g^{(T)} = \frac{\lambda_g}{c_g\rho_g}.$$

Здесь $T_0 = \mathrm{const}$ – температура жидкости; c_g, λ_g, $\nu_g^{(T)}$ – соответственно удельная теплоемкость, теплопроводность и температуропроводность газа; Nu – число Нуссельта; Pe – число Пекле.

С учетом уравнения состояния и неразрывности для температуры газа в пузырьках можно получить

$$\frac{T_g}{T_0} = \frac{p_g}{p_0}\left(\frac{a}{a_0}\right)^3.$$

Принятая система уравнений позволяет адекватно описывать динамику волн с достаточно "крутыми" участками, когда сжатие пузырьков определяется не только эффектами радиальной инерции несущей жидкости, но и акустической разгрузкой на пузырьках и, следовательно, сжимаемостью жидкости.

Процесс воспламенения горючей смеси в пузырьках учтем в рамках мгновенной схемы, согласно которой температура газа T_g при достижении температуры воспламенения T_* скачком увеличивается на величину ΔT [12]. При этом параметр ΔT отвечает за калорийность (теплотворную способность) газовой смеси в пузырьках.

ДВА РЕЖИМА ПРОТЕКАНИЯ ДЕТОНАЦИИ В СУЖАЮЩИХСЯ КАНАЛАХ

В качестве химически активной (способной к детонации) рассматривалась ацетилено-кислородная стехиометрическая смесь $C_2H_2 + 2.5O_2$ ($T_* = 1000$ K, $\Delta T = 3200$ K), а в качестве жидкой фазы – 50%-ная смесь глицерина с водой.

На рис. 1 представлены эпюры давления, радиуса пузырьков и температуры газа, иллюстрирующие динамику процесса возникновения и распространения детонационной волны в цилиндрическом канале с входным сужающимся участком. Числа на графиках у кривых давления (рис. 1б, 1д) соответствуют моментам времени. Остальные графики для радиуса пузырьков, температуры газа в пузырьках представлены для момента времени 2.0 мс (рис. 1в, 1г) и 3.16 мс (рис. 1е, 1ж). Геометрические характеристики канала следующие: диаметр входного сечения – 0.5 м, диаметр цилиндрической части канала – 0.1 м, длина сужающегося участка – 0.4 м (рис. 1а).

Соответствующие начальные и граничные условия могут быть записаны в виде

$$p_l = p_g = p_0, \quad \mathbf{v} = 0, \quad T_g = T_0, \quad a = a_0,$$

$$\alpha_g = \alpha_{g0}, \quad \mathbf{w}_R = 0 \quad (x > 0)$$

при $t = 0$,

$$p = p_0 + \Delta p \quad (t > 0) \text{ при } x = 0.$$

Из рисунка видно, что вследствие увеличения амплитуды эволюционирующей волны в сужающемся участке происходит достижение критических условий воспламенения газовой смеси в пузырьках (достигается температура T_*). Образуется очаг взрыва, который распространяется далее в канале в виде детонационной волны. При этом если объемная концентрация пузырьков меньше некоторого критического значения α_{g0*} (здесь $\alpha_{g0*} \approx \approx 0.04$), то формируется один детонационный солитон, распространяющийся в цилиндрической части канала (рис. 1б–1г). Если начальное объемное содержание пузырьков выше критического значения, детонация протекает с образованием двух детонационных солитонов, движущихся в противоположных направлениях вдоль канала от очага возгорания (рис. 1д–1ж). Этот факт объясняется тем, что при малом начальном объемном газосодержании предварительная "поджатость" пузырьковой жидкости первоначальной волной

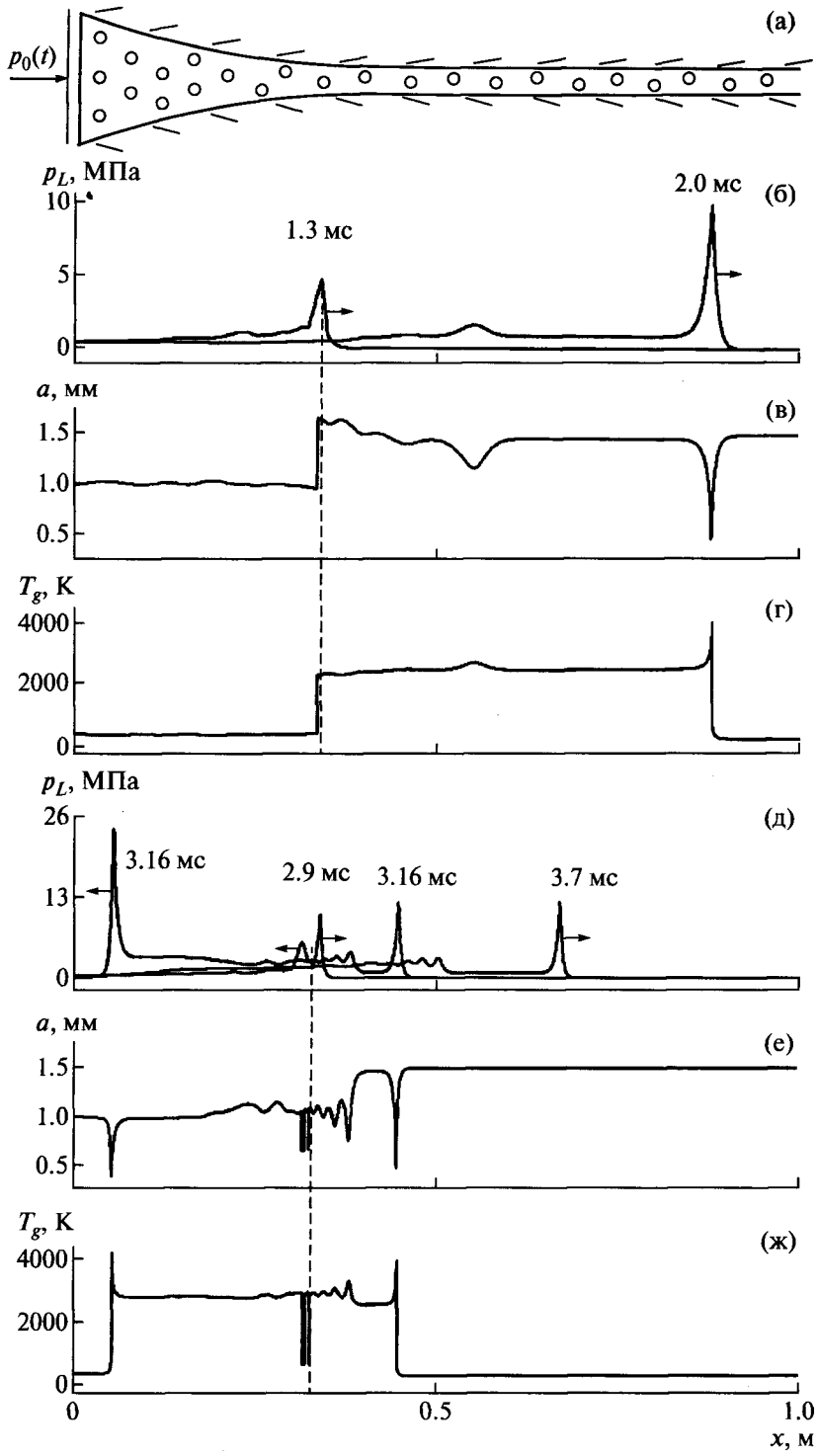

Рис. 1. Динамика детонационной волны в канале с входным сужающимся участком. Параметры, определяющие начальное состояние системы и импульса: $p_0 = 0.1$ МПа, $T_0 = 300$ К, $a_0 = 1.5$ мм; (а)–(г) – $\alpha_{g0} = 0.01$, $\Delta p = 0.37$ МПа; (д)–(ж) – $\alpha_{g0} = 0.05$, $\Delta p = 0.33$ МПа.

препятствует "дожатию" пузырьков до критических параметров детонационной волной, при которых происходит возгорание газовой смеси, и в обратном направлении движется обыкновенная волна давления, быстро угасающая вследствие расширения канала и диссипации. При начальном объемном содержании $\alpha_{g0} > \alpha_{g0*}$ вследствие более тесного расположения пузырьков детонационная волна способна "дожать" их до воспламенения и распространяться также в "поджатой"

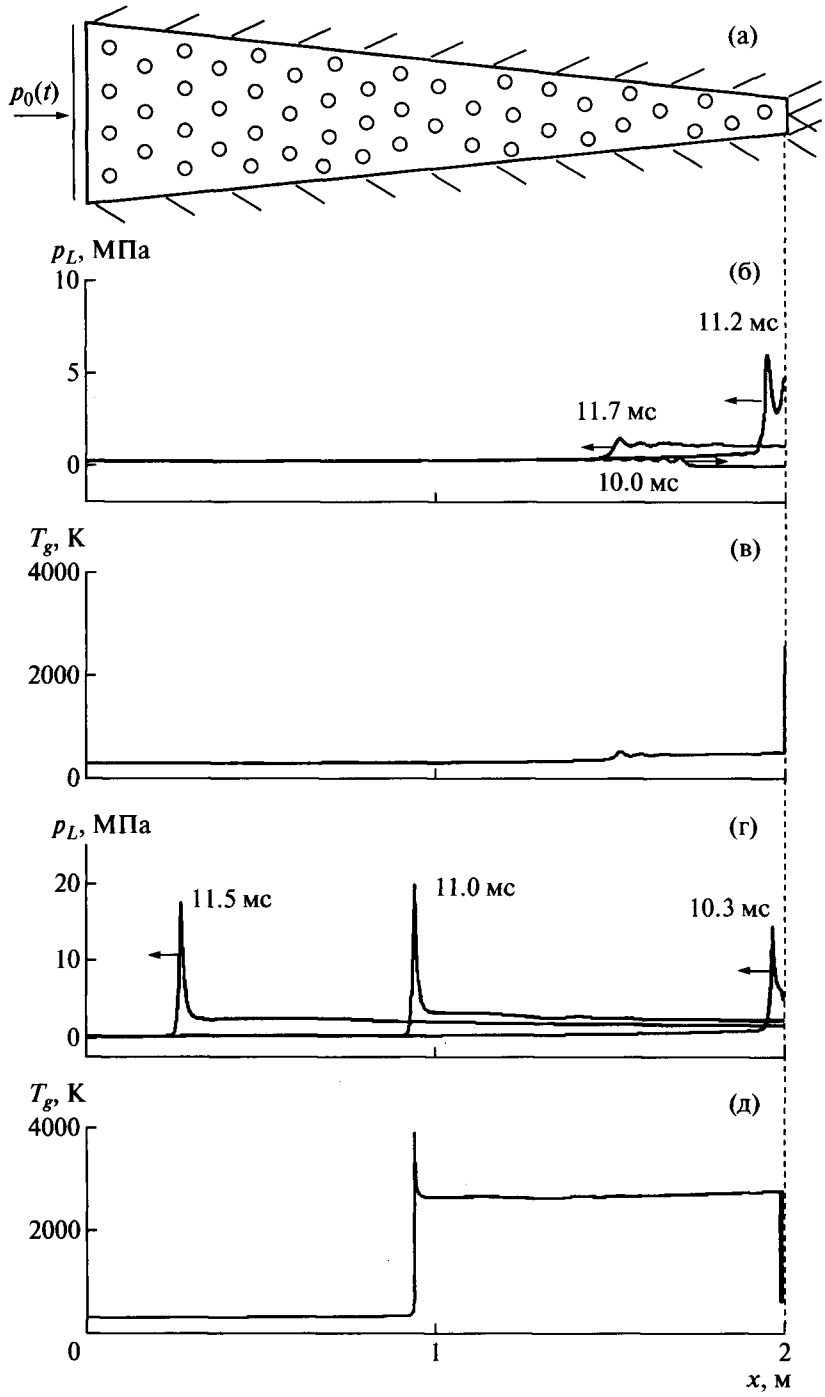

Рис. 2. Картина эволюции волнового импульса, иллюстрирующая возникновение детонационной волны при отражении от дна канала. Начальные параметры пузырьковой смеси: $\mathbf{v}_0 = 0$, $p_{l0} = p_{g0} = 0.1$ МПа, $T_0 = 300$ К, $a_0 = 1.5$ мм, $\alpha_{g0} = 0.01$. Амплитуда импульса давления на входе канала: (а)–(в) – $\Delta p = 0.12$ МПа; (г), (д) – $\Delta p = 0.15$ МПа. Числа у кривых соответствуют моментам времени.

области. При этом, как видно из рис. 1д, для инициирования детонации в "поджатой" области пузырьковой жидкости требуется более высокая амплитуда волны давления – амплитуда детонационного солитона, движущегося в обратном направлении, превышает 20 МПа.

ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ ПРИ ОТРАЖЕНИИ ОТ ДНА СУЖАЮЩЕГОСЯ КАНАЛА

С учетом многократного увеличения амплитуды волны при отражении от твердой преграды,

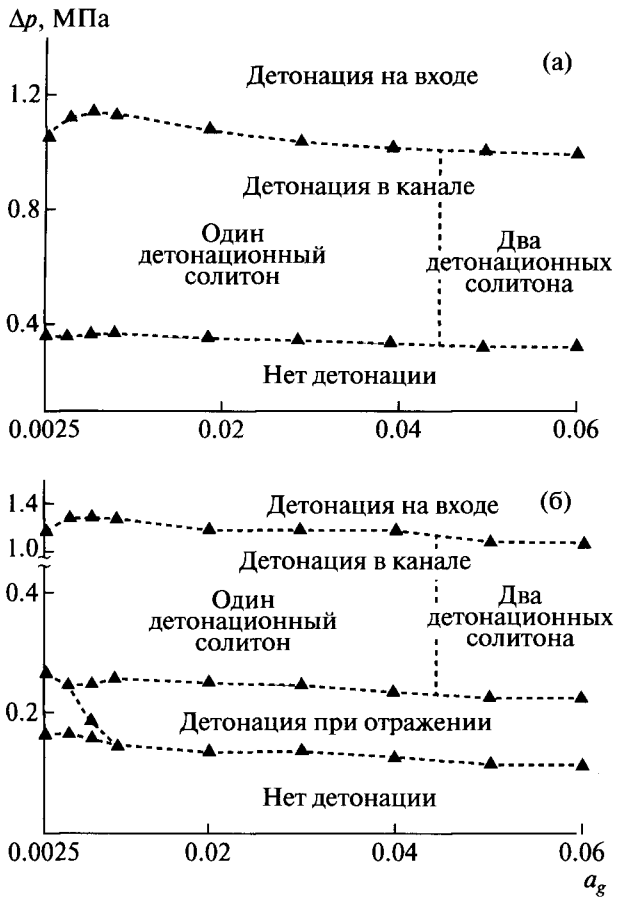

Рис. 3. Карта возможных режимов инициирования детонации в сужающемся канале (а) и емкости с закрытым дном (б).

обусловленного нелинейностью газожидкостной среды, исследована возможность инициирования детонации в емкости переменного сечения с закрытым дном. В качестве такой емкости рассмотрен сужающийся конусообразный канал с "жестким" дном. Геометрические размеры канала следующие: длина – 2 м, диаметр входного сечения – 0.5 м, диаметр дна – 0.1 м (рис. 2а).

На рис. 2б и 2в показана эволюция волны давления с амплитудой на входе Δp = 0.12 МПа. Эпюры для температуры газа в пузырьках представлены для момента времени 11.7 мс. Видно, что из-за многократного увеличения амплитуды отраженной волны на дне канала достигаются критические условия, способные возбудить детонацию (в пузырьках достигается температура воспламенения T_*), и образуется очаг взрыва. Однако, как можно видеть из эпюр давления, детонационная волна в канале не образуется. При переходе отраженной волны в предварительно "поджатую" первоначальной волной пузырьковую жидкость амплитуда волны оказывается недостаточной для "дожатия" пузырьков до критических параметров, при которых происходит возгорание газовой смеси, и отраженная волна эволюционирует в канале как обыкновенная волна давления, которая быстро затухает вследствие расширения канала и диссипации.

Рис. 2г и 2д иллюстрируют случай, когда амплитуда отраженной от дна канала волны достаточна для "дожатия" пузырьков до критического значения, при котором в них достигается температура воспламенения газовой смеси, и как вследствие этого возникает детонационная волна, способная распространяться по "поджатой" жидкости в обратном направлении. Амплитуда "отраженной" детонационной волны достигает 20 МПа.

Дальнейшее увеличение амплитуды, инициируемой на входе волны, приводит к таким же случаям, которые были показаны на рис. 1, т.е. воспламенение газа в пузырьках под воздействием эволюционирующей к концу канала волны происходит до достижения ею дна канала. При этом, если объемная концентрация пузырьков мала ($\alpha_{g0} \le \alpha_{g0*}$), формируется один детонационный солитон, распространяющийся в сторону сужения канала; если начальное объемное содержание пузырьков выше критического значения, то детонация протекает с образованием двух детонационных солитонов.

КАРТЫ ВОЗМОЖНЫХ РЕШЕНИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ В СУЖАЮЩИХСЯ КАНАЛАХ

Возникновение детонационной волны в каналах переменного сечения определяется в основном амплитудой воздействующего на входе импульса давления. При этом вид протекания детонации зависит от начального объемного газосодержания пузырьковой жидкости. На рис. 3 представлена карта решений, иллюстрирующая режимы возникновения детонации в рассмотренных выше каналах. По вертикальным осям отложена амплитуда инициирующей волны, по горизонтальным осям – начальное объемное газосодержание.

В случае каналов с входным сужающимся участком, не ограниченным в конце сужения дном (рис. 3а), детонация может происходить либо на входе в канал (область на графике, ограниченная верхней кривой), либо внутри его. Режим протекания детонации внутри канала зависит от начального объемного газосодержания. В случае сужающихся каналов с закрытым дном появляется еще одна область на карте решений, соответствующая возникновению детонации в канале при отражении волны давления от дна канала (рис. 3б). При малых объемных содержаниях газовой фазы имеется небольшая зона треугольного вида, которая соответствует случаю воспламенения пузырьков на дне канала без возникновения детонационной волны.

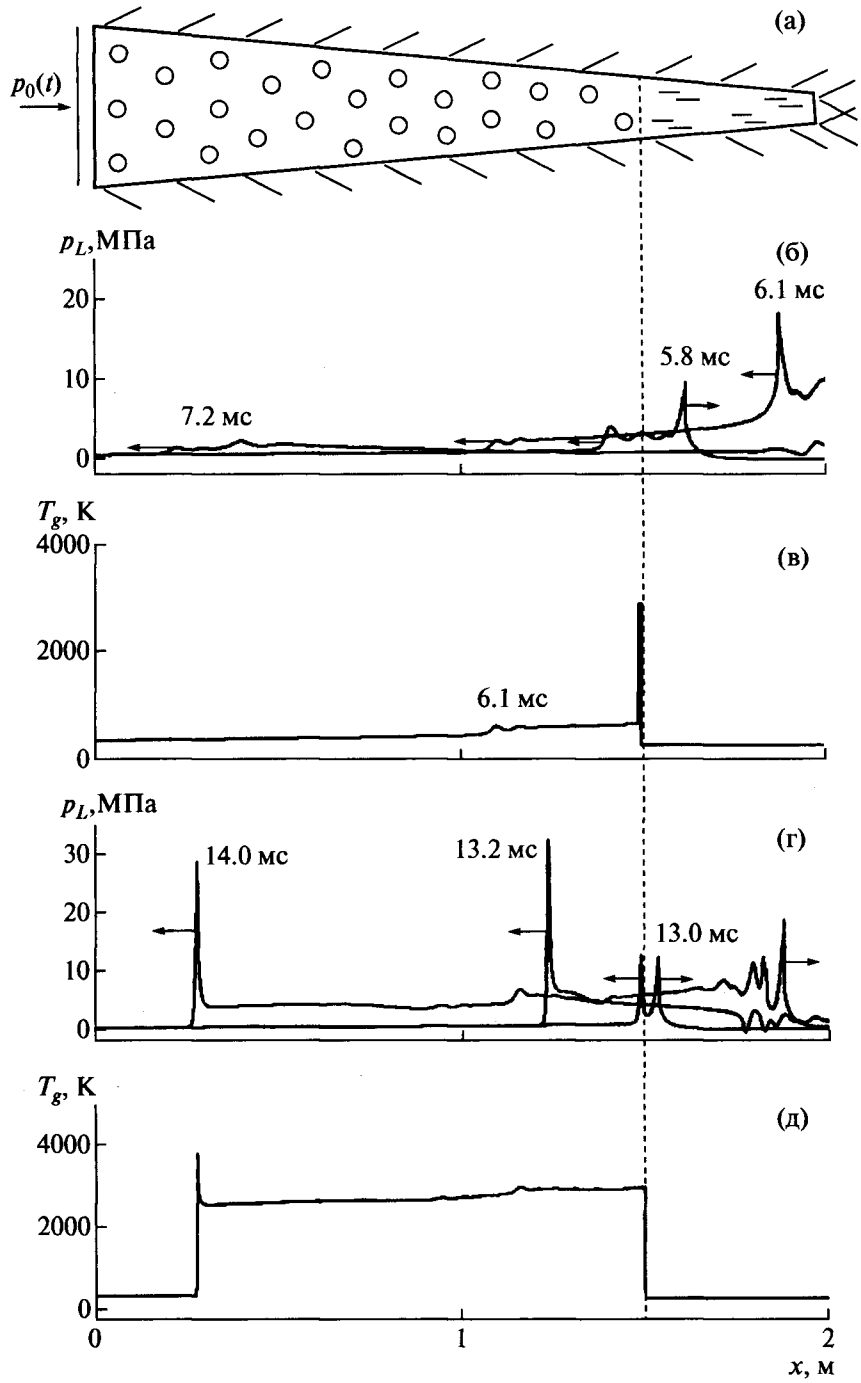

Рис. 4. Динамика инициирования детонационной волны при ударе о слой "чистой" жидкости. Параметры, определяющие начальное состояние системы и импульса: $p_0 = 0.1$ МПа, $T_0 = 300$ K, $a_0 = 1.5$ мм; (а)–(в) – $\alpha_{g0} = 0.01$, $\Delta p = 0.3$ МПа; (г), (д) – $\alpha_{g0} = 0.04$, $\Delta p = 0.3$ МПа.

ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ В СУЖАЮЩЕМСЯ КАНАЛЕ ПРИ ОТРАЖЕНИИ ОТ "ЧИСТОЙ" ЖИДКОСТИ

Также была рассмотрена возможность инициирования детонационной волны в сужающемся канале при переходе ударной волны из пузырьковой жидкости в "чистую", расположенную со стороны дна канала. Прохождение волной давления из зоны с пузырьковой жидкостью в зону с "чистой" жидкостью (являющуюся акустически более жесткой) подобно отражению от "жесткой"

преграды и сопровождается увеличением амплитуды волны вследствие нелинейного отражения ее от границы зон [2]. В результате этого для пузырьков, находящихся вблизи границы раздела зон, может достигаться температура воспламенения T_* и образоваться очаг взрыва.

На рис. 4 представлены эпюры давления и температуры газа, иллюстрирующие динамику процесса возникновения и распространения детонационной волны при отражении от "чистой" жидкости. Числа у эпюр давления (рис. 4б, 4г) соответствуют моментам времени. Эпюры для температуры газа в пузырьках представлены для момента времени 6.1 мс (рис. 4в) и 14.0 мс (рис. 4д). Геометрические размеры канала следующие: длина – 2 м, диаметр входного сечения – 0.5 м, диаметр дна – 0.1 м (рис. 4а). Области "чистой" жидкости соответствует участок 1.5 м $< x <$ 2 м.

Как показывают расчеты, зарождение детонационной волны в канале при прохождении волной давления границы зон пузырьковой и "чистой" жидкостей возможно, если начальное объемное газосодержание пузырьковой жидкости превышает некоторое критическое значение α_{g0*} (в данных условиях $\alpha_{g0*} \approx 0.01$). При $\alpha_{g0} < \alpha_{g0*}$, условия воспламенения газа в пузырьках вблизи границы зон могут достигаться, но возникновение детонационной волны, способной распространяться в "поджатой" пузырьковой жидкости, не происходит (рис. 4б, 4в). При начальном объемном газосодержании пузырьковой жидкости $\alpha_{g0} > \alpha_{g0*}$ амплитуды детонационной волны, образовавшейся при отражении волны давления от слоя "чистой" жидкости, оказывается достаточно, чтобы "дожать" пузырьки до критического значения, при котором достигается температура воспламенения газовой смеси в пузырьках. В этом случае в канале в обратном направлении от зоны "чистой" жидкости может распространяться устойчивая детонационная волна с амплитудой, достигающей 30 МПа (рис. 4г, 4д). При этом очевидно, что смещение границы раздела зон к входному сечению канала приводит к росту амплитуды инициирующей волны, способной возбудить детонацию в канале при ударе о слой "чистой" жидкости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе численного исследования показана возможность инициирования слабым импульсом давления детонационной волны в цилиндрическом канале с помощью входного сужающегося участка. Выявлено, что в зависимости от объемного содержания пузырьков возможны два режима дальнейшей эволюции детонационной волны, возникающей за счет усиления волн в сужающихся каналах. Если объемное содержание пузырьков выше некоторого критического значения α_{g0*} (для рассмотренных каналов $\alpha_{g0*} \approx 0.04$), то детонационная волна распространяется в обоих направлениях от места взрыва. В том случае, когда объемное содержание ниже этого критического значения, детонационная волна движется в направлении сужения канала.

В сужающихся емкостях с закрытым дном показано появление "отраженной детонации", заключающейся в возникновении устойчивой детонационной волны при отражении от дна канала или от слоя "чистой" жидкости, экранирующего дно.

Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н., профессору В.Ш. Шагапову за постановку задачи и обсуждение результатов. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 08-01-97033), INTAS № 05-1000008-7921 и гранта МД-280.2008.1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hasegawa T., Fujiwara T.* Detonation in Oxihydrogen Bubbled Liquids. In: 19th Symposium (International) on Combustion. Haifa: The Combustion Institute, 1982. P. 675.
2. *Kedrinskii V.K., Mader Ch.* Accidential Detonation in Bubbly Liquids // Proc. 16th Int. Symp. on Shock Tube and Waves / Ed. Groenig H. Aachen: VCH, 1987. P. 371.
3. *Ляпидевский В.Ю.* Структура детонационных волн в многокомпонентных пузырьковых средах // ФГВ. 1997. Т. 33. № 3. С. 104.
4. *Ждан С.А.* О стационарной детонации в пузырьковой среде // ФГВ. 2002. Т. 38. № 3. С. 85.
5. *Пинаев А.В., Сычев А.И.* Влияние физико-химических свойств газа и жидкости на параметры и условия возникновения детонационных волн в системах "жидкость–газовые пузырьки" // ФГВ. 1987. Т. 23. № 6. С. 76.
6. *Нигматулин Р.И., Шагапов В.Ш., Гималтдинов И.К., Ахмадуллин Ф.Ф.* Взрыв пузырьковой завесы с горючей смесью газов при воздействии импульсом давления // ДАН. 2003. Т. 388. № 5. С. 611.
7. *Суров В.С.* Влияние геометрического фактора на распространение ударных волн в дисперсных средах // ТВТ. 1998. Т. 36. № 6. С. 1001.
8. *Минеев В.Н., Набоко И.М., Паршиков А.Н. и др.* Горение и взрыв в замкнутой конической полости. Физический эксперимент // ТВТ. 1999. Т. 37. № 2. С. 313.
9. *Сычевский В.А.* Обработка частиц газовой детонацией // ТВТ. 2008. Т. 46. № 5. С. 751.
10. *Нигматулин Р.И.* Динамика многофазных сред. Ч. 1. М.: Наука, 1987. 464 с.
11. *Нигматулин Р.И., Шагапов В.Ш., Вахитова Н.К.* Проявление сжимаемости несущей фазы при распространении волн в пузырьковой среде // ДАН. 1989. Т. 304. № 35. С. 1077.
12. *Batchelor G.K.* Compression Waves in a Suspension on of Gas Bubbles in Liquid. In: Fluid Dinamics Transactions. V. 4. Warszawa, 1969. P. 425.