

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 534.222.2+533.6.011.72

ПАРАМЕТРЫ ВОЗДУШНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СИММЕТРИИ

© 2020 г. С. И. Сумской^{1*}, А. С. Софьин², С. Х. Зайнетдинов², А. А. Агапов²

¹Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, России

²ЗАО “Научно-технический центр “Промышленная безопасность”, Москва, России

*E-mail: sumskoi@mail.ru

Поступила в редакцию 03.02.2020;

после доработки 03.02.2020;

принята в печать 20.02.2020

В работе проведен численный анализ параметров ударных волн, образующихся при расширении объемов сжатого метана цилиндрической формы. С использованием полученных высокоточных численных решений построена единая безразмерная аппроксимация зависимости избыточного давления от расстояния. Выполнена оценка значений избыточного давления в ударной волне для ближней и дальней зон одновременно. Сравнение с ранее разработанными аналогичными зависимостями показывает более высокую точность предложенной аппроксимации, что позволяет использовать ее для прогнозирования последствий аварий при разрыве трубопроводов.

Ключевые слова: ударные волны цилиндрической симметрии, автомодельные решения, безразмерное давление, безразмерное расстояние, численное моделирование, метан.

DOI: 10.31857/S0207401X20080117

ВВЕДЕНИЕ

Определение параметров воздушных ударных волн (УВ) в цилиндрической симметрии (далее – цилиндрических волн) представляет значительный интерес, в том числе для оценки последствий аварийных разрывов газопроводов. Современные трубопроводные системы для транспортировки природного газа характеризуются большими диаметрами (до 1.4 м) и высокими давлениями (до 20 МПа и выше). При разрушении такого трубопровода в воздухе могут возникать мощные УВ. Ситуация усугубляется тем, что разрушение газопровода обычно происходит в виде протяженного раскрытия трубы, которая раскрывается на линейном участке протяженностью до 20 диаметров. В результате газ за время раскрытия трещины начинает расширяться в атмосферу из объема, имеющего существенно различающиеся продольный и поперечный размеры.

Соответственно, УВ вблизи места разрушения не может рассматриваться как сферическая волна, по крайней мере на расстояниях от трубопровода порядка длины разрыва. Понятно также, что именно в этой области достигаются высокие давления, которые могут создавать значительные разрушения. Поэтому, для оценки степени этих разрушений, необходимо корректно описывать профиль давления в изначально несферической УВ.

Наиболее общим решением такой проблемы может быть многомерное численное моделирование процесса истечения сжатого природного газа, двигавшегося по трубе, при соответствующем динамическом разрушении стенки трубопровода. Однако в ряде случаев выполнение таких расчетов весьма затруднительно. Например, при анализе риска, когда моделируется множество – до десятков и даже сотен тысяч – различных ситуаций. Поэтому было бы желательно иметь аппроксимации в виде простых формул для определения зависимости давления от расстояния.

Как известно, такие зависимости широко распространены в приложении к оценке давления в сферически-симметричных УВ. В качестве примера существующих можно привести следующие зависимости:

– аппроксимации опытов по взрыву зарядов конденсированного взрывчатого вещества (ВВ) [1–5], в том числе модели, адаптированные для взрывов газовых смесей с учетом размера облака и изменения величины тротилового эквивалента газового взрыва в зависимости от расстояния [6–9];

– аппроксимации опытов по детонации газовых облаков [10, 11];

– аппроксимация расчетных данных для задач, моделирующих различные взрывные процессы, которые включают стадию разлета сжатого газа [4], газовую детонацию [12], точечный взрыв [13] и

детонацию конденсированных взрывчатых веществ (ВВ) [1, 2];

– результаты аналитических решений на основе теории подобия [14, 15].

К сожалению, эти модели в сферической симметрии напрямую не применимы к цилиндрической. Тем не менее, в двух из перечисленных выше методов предусмотрены варианты расчета параметров цилиндрических волн [4, 14]. Причем в работе [4] учет цилиндрической волны проводится путем введения поправочных коэффициентов в зависимость давления от расстояния для сферической волны, а в работе [14] рассматривается сосредоточенный взрыв. Наряду с этими подходами можно отметить наличие эмпирической корреляции давления в воздушной УВ при взрыве цилиндрических зарядов конденсированных ВВ [16].

Очевидно, что такие рассмотрения цилиндрической волны [4, 14, 16] являются лишь определенным приближением задачи при отыскании параметров УВ при расширении объема сжатого газа цилиндрической формы (далее – цилиндрического объема). Например, в работе [4] в полной мере не учитывается расхождение возникающего цилиндрического потока. В работе [14] не учитывается конечный размер области высокого давления. А в работе [16] не учитываются особенности передачи энергии воздушной УВ, характерные для расширения сжатого газа. В такой ситуации для цилиндрической волны, возникающей при расширении сжатого газа метана, целесообразно получить простые аналитические зависимости давления во фронте УВ от расстояния. В настоящей работе они строятся на основе результатов численного моделирования.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Предлагается рассмотреть задачу о расширении цилиндрического объема сжатого метана. Задача рассматривается в одномерной постановке. Течение описывается системой одномерных газодинамических уравнений Эйлера для цилиндрической симметрии, выражающих законы сохранения массы, импульса и энергии в лагранжевых массовых координатах:

$$V = r \frac{\partial r}{\partial m}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -r \frac{\partial p}{\partial m}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial (i + u^2/2)}{\partial t} = -\frac{\partial (rpu)}{\partial m}. \quad (3)$$

В качестве исходного как для метана, так и для воздуха использовалось уравнение состояния идеального газа:

$$p = \frac{i(\gamma - 1)}{V}. \quad (4)$$

В формулах (1)–(4) t – время, r – расстояние, m – лагранжева массовая координата, V – удельный объем, p – давление, u – скорость, i – удельная внутренняя энергия, γ – показатель адиабаты, равный 1.4 для воздуха и 1.32 для метана соответственно.

В качестве начального рассматривается бесконечный цилиндрический объем радиусом R_0 сжатого до давления P_0 метана, находящийся в воздухе. В расчетах давление P_0 варьировалось от 0.4 до 50 МПа, а радиус – от $0.1 \cdot \sqrt{2}$ до $0.7 \cdot \sqrt{2}$. Температура воздуха и метана полагалась равной $T_0 = 273$ К, давление в воздухе $P_{sur} = 101325$ Па.

Поскольку решение данной задачи рассматривается в контексте его возможного приложения к оценке параметров УВ при аварийных разрывах газопроводов, следует особо отметить консерватизм данной постановки задачи в приложении к практике.

Во-первых, при разрушении реальных газопроводов, лежащих на поверхности либо незначительно заглубленных, часть энергии сжатого газа передается УВ, уходящей в грунт. Оставшаяся энергия передается УВ, распространяющейся в полупространстве над землей. В связи с этим используемый в постановке задачи радиус R_0 должен быть разделен на $\sqrt{2}$, и именно эту величину следует относить к реальному трубопроводу, пренебрегая энергией, уходящей в грунт.

Во-вторых, в реальной системе газопровод–грунт–воздух есть потери энергии сжатого газа на разрушение трубопровода и на метание грунта (при подземной прокладке трубопровода). В рассматриваемой постановке энергия сжатого газа идет на формирование УВ без таких потерь. Заметим, что пренебрежение этими факторами означает, что вся энергия сжатого природного газа участвует в формировании УВ. Последнее должно приводить к завышению рассчитываемых давлений на фронте УВ. Система уравнений (1)–(4) с соответствующими начальными условиями решалась численно с использованием разностных методов [17–19].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Численные расчеты проводились на разностной сетке с шагом 0.2 мм для области сжатого газа и 10 мм для воздуха. Размер расчетной области составлял 500 м по радиусу (в некоторых расчетах –

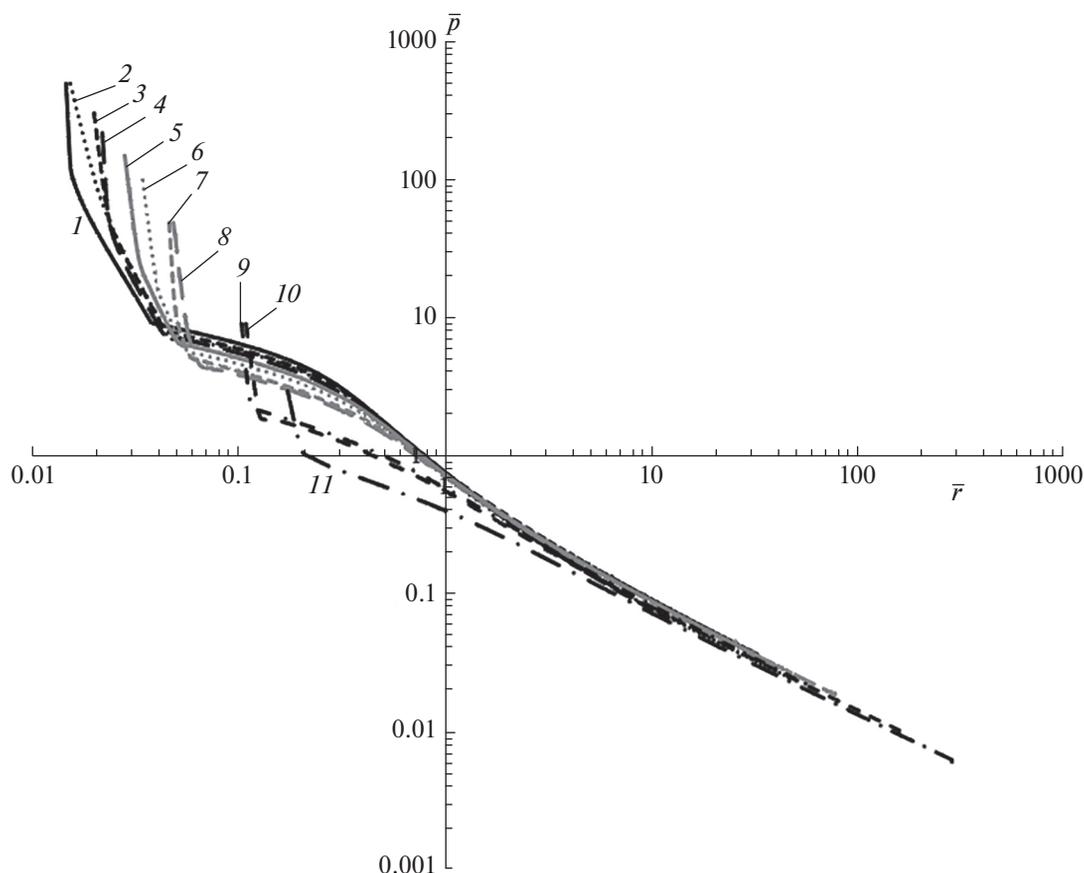


Рис. 1. Зависимость безразмерного максимального давления от безразмерного расстояния для цилиндрических объемов сжатого метана с различными значениями начальных давлений P_0 и радиусов R_0 : 1 – 50 МПа, $0.1 \cdot \sqrt{2}$ м; 2 – 50 МПа, $0.7 \cdot \sqrt{2}$ м; 3 – 30 МПа, $0.2 \cdot \sqrt{2}$ м; 4 – 22.1 МПа, $0.6 \cdot \sqrt{2}$ м; 5 – 15 МПа, $0.2 \cdot \sqrt{2}$ м; 6 – 10 МПа, $0.2 \cdot \sqrt{2}$ м; 7 – 5 МПа, $0.6 \cdot \sqrt{2}$ м; 8 – 5 МПа, $0.2 \cdot \sqrt{2}$ м; 9 – 1 МПа, $0.6 \cdot \sqrt{2}$ м; 10 – 1 МПа, $0.2 \cdot \sqrt{2}$ м; 11 – 0.4 МПа, $0.2 \cdot \sqrt{2}$ м.

1000 м). Этому расстоянию соответствовали избыточные давления на фронте УВ в несколько кПа.

Выбранное разбиение позволяло получить точность расчета избыточного давления на фронте УВ в 1–2%. Именно такая разница в численных решениях проявлялась при уменьшении перечисленных выше разностных шагов еще в 2 раза.

Результаты различных вариантов расчетов приведены на рис. 1. Расстояние отсчитывается от оси цилиндрического объема сжатого газа. Обезразмеривание проведено для перепада давления на фронте УВ и расстояния следующим образом:

$$\bar{p} = \frac{\Delta p}{P_{sur}}, \quad \bar{r} = \frac{r}{(E_g/P_{sur})^{1/2}},$$

где E_g – энергия сжатого газа на единицу длины, определяемая с использованием формулы (4). Для наглядности все кривые проведены от границы области сжатого газа (R_0, P_0).

Из рис. 1 видно, что все кривые в безразмерном виде имеют примерно один и тот же характерный вид, причем на каждой кривой можно выделить три различных участка:

- резкий спад давления на начальном участке, когда ход каждой кривой определяется начальным давлением P_0 и в меньшей степени размером области изначально сжатого газа;

- плавный спад давления до $\bar{r} = 2$, когда кривые, соответствующие одинаковым начальным давлениям в изначально сжатой области, идут близко друг к другу, и их ход слабо зависит от размеров области изначально сжатого газа;

- автомодельный спад давления при $\bar{r} > 2$, когда все кривые, независимо от начальных данных, начинают сливаться.

Можно выделить три характерные точки, определяющие границы этих интервалов:

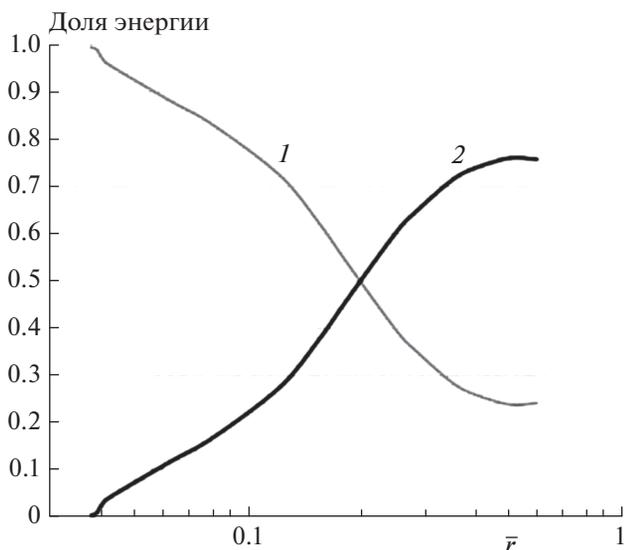


Рис. 2. Зависимость доли полной энергии в метане (1) и в воздушной УВ (2) от безразмерного расстояния.

- точка 1, соответствующая начальному давлению P_0 в области сжатого газа и начальному размеру R_0 этой области;
- точка 2, соответствующая завершению быстрого спада давления и отстоящая от точки 1 на несколько радиусов R_0 ;
- точка 3 с безразмерным радиусом, равным двум, начиная с которой задача становится автономной.

Безразмерные расстояния и давления в этих точках можно обозначить как (\bar{r}_1, \bar{p}_1) , (\bar{r}_2, \bar{p}_2) , (\bar{r}_3, \bar{p}_3) соответственно. Резкий спад давления на начальных участках безразмерных кривых от точки 1 до точки 2 обусловлен тем, что на этом участке энергия изначально сжатого газа только в малой степени перешла в энергию волны. Поэтому при наличии расхождения потока за УВ в цилиндрической симметрии ударная волна может быстро затухать. Основная доля энергии сжатого газа передается УВ на втором участке, и переход к автономным решениям происходит к моменту перехода основной доли энергии сжатого газа в УВ.

На рис. 2 для случая $P_0 = 22.1$ Па и $R_0 = 0.6 \cdot \sqrt{2}$ м показаны зависимости долей полной энергии в метане и в воздушной УВ от безразмерного расстояния. Полная энергия воздуха вычислялась с поправкой на его начальную энергию. Такое разделение позволяет увидеть, как энергия сжатого газа переходит в энергию УВ, которая, как следует из вышесказанного, оценивается по изменению полной энергии воздуха. Из этого рисунка следует, что до $\bar{r} = 2$ основная доля энергии сжатого газа уже перешла в УВ.

Обращаясь теперь ко второму участку зависимостей на рис. 1, можно заметить, что безразмерные кривые, полученные при одном значении начального давления и разных начальных размерах области исходного сжатия, лежат достаточно близко друг другу. То есть безразмерное давление в этом интервале зависит главным образом от начального давления и слабо — от размера начальной области сжатого метана. Это обстоятельство упрощает построение безразмерной функции давления от безразмерного расстояния для всех начальных условий R_0, P_0 и позволяет представить ее в виде единой параметрической зависимости.

ПОСТРОЕНИЕ БЕЗРАЗМЕРНОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДАВЛЕНИЯ ОТ РАССТОЯНИЯ ДЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ УВ, ФОРМИРУЮЩЕЙСЯ ПРИ РАЗЛЕТЕ СЖАТОГО МЕТАНА

Из сказанного выше можно сделать заключение о возможности представить все семейство кривых на рис. 1 в виде общей безразмерной зависимости с параметрами, определяющими различный характер хода кривых до расстояния $\bar{r} = 2$. В качестве таких параметров полагается использовать безразмерные параметры в точке 2 как функции начального давления в области сжатого метана. Это подтверждается зависимостями \bar{r}_2 и \bar{p}_2 от величины отношения P_0/P_{sur} , полученными при обработке функций $\bar{p}(\bar{r})$, представленных на рис. 1 для различных значений R_0, P_0 . Эти зависимости, полученные методом наименьших квадратов, выглядят следующим образом:

$$\bar{p}_2 = 5 \cdot 10^{-7} \bar{P}_0^3 - 6.15 \cdot 10^{-4} \bar{P}_0^2 + 0.3072 \bar{P}_0 - 0.0277, \quad \bar{r}_2 = 0.3779 \bar{P}_0^{-0.482}, \quad (5)$$

где $\bar{P}_0 = P_0/P_{sur}$. Зависимости (5) представлены на рис. 3а и б соответственно для точки \bar{p}_2 и \bar{r}_2 .

Значения \bar{p}_1 и \bar{r}_1 определялись по начальным характеристикам области сжатого газа

$$\bar{p}_1 = \bar{P}_0 = \frac{P_0}{P_{sur}}, \quad \bar{r}_1 = \frac{R_0}{(E_g/P_{sur})^{1/2}}. \quad (6)$$

Значение \bar{p}_3 при $\bar{r}_3 = 2$ принималось равным максимальному из всех рассчитанных значений давления (см. рис. 1):

$$\bar{p}_3 = 0.3635, \quad \bar{r}_3 = 2. \quad (7)$$

Аппроксимация $\bar{p}(\bar{r})$ состоит из трех кусочных участков, первый и второй из которых описываются степенными функциями от расстояния \bar{r} , а третий — полиномом от $\ln(\bar{r})$:

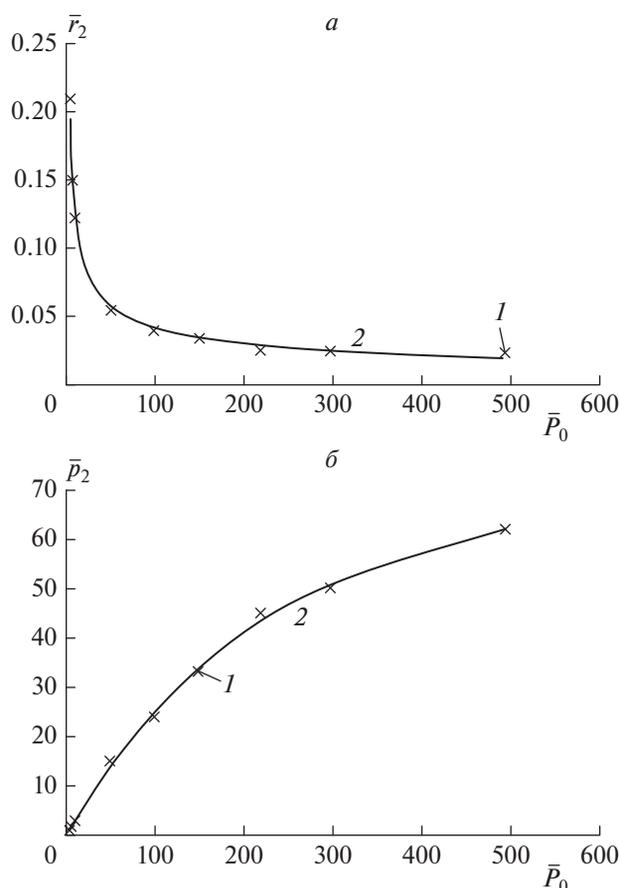


Рис. 3. Зависимости безразмерных давления \bar{p}_2 (а) и радиуса \bar{r}_2 (б) от безразмерного начального давления \bar{P}_0 . Точки – результаты расчетов, линия – аппроксимация методом наименьших квадратов.

$$\bar{p}(\bar{r}) = k_1 \bar{r}^{b_1} \quad \text{при} \quad \bar{r}_1 \leq \bar{r} < \bar{r}_2, \quad (8)$$

$$\bar{p}(\bar{r}) = k_2 \bar{r}^{b_2} \quad \text{при} \quad \bar{r}_2 \leq \bar{r} < \bar{r}_3, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \bar{p}(\bar{r}) = & -0.0003 \ln^5(\bar{r}) + 0.0064 \ln^4(\bar{r}) - \\ & - 0.055 \ln^3(\bar{r}) + 0.2445 \ln^2(\bar{r}) - \\ & - 0.5946 \ln(\bar{r}) + 0.672, \quad \text{при} \quad \bar{r}_3 \leq \bar{r} \leq 200, \end{aligned} \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} b_1 = \ln\left(\frac{\bar{p}_2}{\bar{p}_1}\right) \ln^{-1}\left(\frac{\bar{r}_2}{\bar{r}_1}\right), \quad k_1 = \bar{p}_1 / \bar{r}_1^{b_1}, \\ b_2 = \ln\left(\frac{\bar{p}_3}{\bar{p}_2}\right) \ln^{-1}\left(\frac{\bar{r}_3}{\bar{r}_2}\right), \quad k_2 = \bar{p}_2 / \bar{r}_2^{b_2}. \end{aligned}$$

Таким образом, соотношения (8)–(10) позволяют оценить давление в цилиндрической УВ, исходя из начальных параметров – давления и размера области изначально повышенного давления. Следует также отметить, что данный подход может быть распространен и на волны в иных средах, например в водной среде [20–22].

СРАВНЕНИЕ С РАНЕЕ ПОЛУЧЕННЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ

Как отмечалось во Введении, существует несколько методов оценки параметров цилиндрических УВ с использованием простых аппроксимаций [4, 14, 16]. В связи с этим возникает вопрос, как соотносятся давления в УВ, рассчитанные по предложенному подходу (8)–(10), с данными высокоточных расчетов и расчетов по ранее предложенным подходам.

На рис. 4 для одной из расчетных ситуаций (см. кривую 4 на рис. 1) приведены зависимости, полученные как с помощью высокоточного численного моделирования – линия 1, так и с использованием предложенных соотношений (8)–(10) – линия 2. Как видно из рис. 4, предложенный подход дает оценку давления в УВ с определенным завышением (консерватизмом). Вместе с тем следует отметить, что предложенные соотношения точнее передают изменение давления в зависимости от расстояния: например, предложенные ранее соотношения [4] демонстрируют более высокие

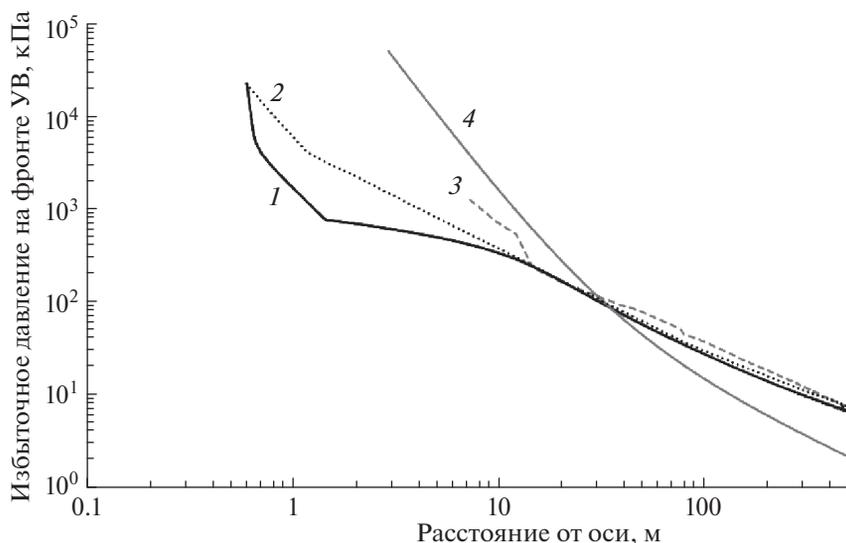


Рис. 4. Зависимость максимально достигаемого давления в УВ от расстояния при расширении цилиндрического объема сжатого метана (22.1 МПа, $0.6 \cdot \sqrt{2}$ м): 1 — высокоточное численное решение системы уравнений (1)–(4); 2 — расчет по приближенным формулам (8)–(10); 3 — расчет по методике из работы [4]; 4 — расчет по методике из работы [5].

значения давления в ближней к области сжатого газа зоне (линия 3 на рис. 4).

Еще более искаженную картину изменения давления в зависимости от расстояния дает расчет по отраслевому документу [5] (линия 4 на рис. 4). Существенная ошибка расчета по этой методике связана с использованием в зависимости данных для случая сферической УВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проанализировано существующее положение дел в части расчета параметров цилиндрических УВ с использованием простых параметрических зависимостей. Показано, что существующие подходы упрощены и не дают полного представления о параметрах цилиндрических УВ. С другой стороны, существует большая практическая необходимость в таких зависимостях, прежде всего для предсказания последствий аварийного разрыва трубопроводов с природным газом.

Исходя из этого, был предложен вариант универсальной зависимости для расчета давлений в цилиндрической УВ, формирующейся при расширении сжатого метана. Эта зависимость построена по результатам газодинамических расчетов в практически актуальном диапазоне начальных размеров и давлений области изначально высокого давления (0.1–1.5 м и 2–500 атм).

Зависимость представляет собой кусочную функцию безразмерного давления от безразмерного расстояния. В отличие от ранее предложенных аналогов на кривых этой зависимости выделено три участка.

В качестве параметров для построенной аппроксимации были выбраны: безразмерные радиус и давление начальной области, а также безразмерные радиус и давление в точке перехода от первого участка ко второму, т.е. в точке завершения быстрого спада. Показано, что полученная зависимость хорошо описывает результаты высокоточных численных расчетов. Проведено ее сравнение с имеющимися аналогами. Показана более высокая точность предложенной зависимости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Садовский М.А. // Физика взрыва. Сб. № 1 научно-исследовательских работ в области физики взрыва. М.: Изд-во АН СССР, 1952.
2. Адушкин В. В., Коротков А.И. // ЖПМТФ. 1961. № 5. С. 119.
3. Kingery C.N., Bullmash G. Air Blast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst. Tech. Rep. ARBRL-TR 02555, US Army, Ballistic Res. Lab., Aberdeen Proving Ground, MD, 1985.
4. Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П. и др. Взрывные явления. Оценка и последствия: В 2-х кн. Кн. 1. Пер. с англ. / Под ред. Зельдовича Я.Б., Гельфанда Б.Е. М.: Мир, 1986.
5. СТО Газпром 2-2.3-351–2009. Методические указания по проведению анализа риска для опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО «Газпром». М.: ООО «Газпром экспо», 2009.
6. Braise W.C., Simpson D.W. // Loss Prevention. 1968. V. 2. P. 91.
7. Prugh R.W. // Proc. Intern. Conf. Vapor Cloud Modeling. Cambridge, MA, 1987. P. 712.

8. *Harvey B.H.* Second Report of the Advisory Committee on Major Hazards. London: HM Stationery Office, 1979.
9. *Harris R.J., Wickens M.J.* Understanding Vapor Cloud Explosions – An Experimental Study. Comm. 1408. London: Inst. Gas Engineers, 1989.
10. *Когарко С.М., Адушкин В.В., Лямин А.Г.* // Науч.-техн. пробл. горения и взрыва. 1965. № 2. С. 22.
11. *Адушкин В.В., Гостинцев Ю.А., Фортвов В.Е.* Энергетические характеристики взрыва и параметры ударных волн в воздухе при детонации водородосодержащих облаков в свободной атмосфере. Препринт. Черногловка: ИХФЧ РАН, 1995.
12. *Brossard J., Bailly P., Desrosier C., Renard J.* // Progr. Aeron and Astron. 1988. V. 114. P. 389.
13. *Коробейников В.П., Чушкин П.И.* // Тр. МИАН СССР. 1966. Т. 87. С. 4.
14. *Коробейников В.П., Мельникова Н.С., Рязанов Е.В.* Теория точечного взрыва. М.: Физматгиз, 1961.
15. *Коробейников В.П.* // Докл. АН СССР. 1956. Т. 111. № 3. С. 557.
16. *Цикулин М.А.* // ЖПМТФ. 1960. № 3. С. 188.
17. *Борисов А.А., Гельфанд Б.Е., Губин С.А., Одинцов В.В., Шаргатов В.А.* // Хим. физика. 1986. Т. 5. № 5. С. 435.
18. *Venson D.J.* // Хим. физика. 2006. Т. 25. № 6. С. 70.
19. *Гельфанд Б.Е., Губин С.А., Михалкин В.Н., Шаргатов В.А.* // Хим. физика. 1984. Т. 3. № 3. С. 435.
20. *Комиссаров П.В., Борисов А.А., Басакина С.С., Лавров В.В.* // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 8. С. 12.
21. *Авдеев К.А., Аксенов В.С., Борисов А.А., Севастополева Д.Г. и др.* // Хим. физика. 2017. Т. 36. № 4. С. 20.
22. *Комиссаров П.В., Соколов Г.Н., Борисов А.А.* // Хим. физика. 2011. Т. 30. № 2. С. 62.