

ПАРАМЕТРЫ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ ПРИ РАЗРЫВЕ ПОДВОДНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

© 2023 г. С. И. Сумской¹, А. С. Софьин², С. Х. Зайнетдинов², А. А. Агапов², В. С. Сафонов³

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

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

³ООО “Газпром ВНИИГАЗ”, п. Развилка, Московская область, Россия

*E-mail: sumskoi@mail.ru

Поступила в редакцию 07.03.2023;

после доработки 15.03.2023;

принята в печать 20.03.2023

В работе численно исследованы параметры ударных волн, образующихся при расширении цилиндрических объемов сжатого метана в случае, когда сжатый газ находится в воде. Такая задача моделирует разрыв подводных газопроводов. Сжатый метан рассматривался при давлении 10.1 МПа, типичном для систем магистральных трубопроводов. Получены зависимости давления от расстояния от оси трубопровода в волнах в окружающей водной массе. При этом в волнах в воде наблюдается характерный для цилиндрической геометрии “горбовидный” профиль. Рассмотрено взаимодействие волн при выходе на свободную поверхность и при прохождении слоя стали.

Ключевые слова: ударные волны в воде, аварийные разрывы газопровода, численное моделирование, метан, выход волн на поверхность.

DOI: 10.31857/S0207401X23080101, **EDN:** IHFVJM

1. ВВЕДЕНИЕ

Расчет параметров цилиндрических ударных волн (УВ) в водной среде представляет значительный интерес, в частности при оценке последствий аварий на морских газопроводах. Последствия таких аварий сопровождаются множеством опасных проявлений:

- выбросом горючего газа, который, попадая в атмосферу, способен образовывать топливно-воздушные смеси;

- образованием пузырьковых сред в водной толще при истечении газа из разрушенного трубопровода, что чревато снижением плавучести в такой водно-пузырьковой среде, а с другой стороны, при выходе на водную поверхность способствует формированию больших площадей, эмитирующих пожароопасный метан в атмосферу;

- распространением волн давления, включая их выход из воды в воздух, переход в твердые среды (в стальной корпус судна) и т.д.

События диверсионного характера на трубопроводах “Северный поток-1” и “Северный поток-2” в октябре 2022 года продемонстрировали масштаб последствий разрушения подводных газопроводов и лишней раз подтвердили, что необходимо уметь оценивать такие последствия, по-

нимать степень опасности подобных объектов и рисков угроз, создаваемых ими. При этом следует отметить, что разрыв подводных газопроводов и параметры волн давления, возникающих при этом, изучены явно недостаточно, в отличие от сухопутных участков, когда волна давления после разрыва трубопровода распространяется в воздухе [1–3].

Соответственно, на сегодня отсутствуют рекомендации и инженерные подходы для определения параметров волн давления в воде при разрыве газопроводов. Хотя для сферических зарядов подходы к расчету параметров волн давления при подводных взрывах разработаны довольно давно [4–6]. Существуют также работы, посвященные комплексному трехмерному численному моделированию разрыва подводных газопроводов [7, 8]. Однако, как показано в [9], такие расчеты не всегда позволяют достигнуть необходимой для практического применения точности. С учетом вышеизложенного в данной работе с помощью высокоточного численного метода моделируются волны давления в воде с целью оценки параметров их динамического воздействия в различных ситуациях.

Следует отметить, что ударные волны, формирующиеся при разрыве газопровода, имеют одну особенность. Разрушение газопровода обычно

имеет место в форме протяженной трещины. Труба рвется не поперек, а вдоль оси трубопровода: длина раскрытия трещины составляет до 20 диаметров трубопровода. Поэтому источником волны давления является расширяющийся объем газа, имеющий существенно различные продольный (длина разрыва) и поперечный (диаметр трубопровода) размеры. Соответственно, фронт УВ будет иметь сложную форму. И если на удалении такая волна асимптотически стремится к сферической, то вблизи места разрушения ее можно рассматривать скорее как цилиндрическую.

Именно параметры цилиндрической волны предпочтительнее использовать для оценки последствий разрыва подводных газопроводов. В данной работе для оценки параметров волн давления, образующихся при разрыве типичных газопроводов, предлагается рассматривать цилиндрическую волну. Поскольку основной целью является рассмотрение параметров сильных волн, которые реализуются вблизи места разрыва (на расстояниях порядка длины разрыва трубопровода), то рассмотрение будет проводиться в одномерной постановке. Одномерное рассмотрение упрощает картину течения, и результаты одномерных расчетов могут использоваться как консервативная (завышенная) оценка параметров волн: при многомерном течении существует разгрузка от распространения волн вдоль неразрушенных участков трубы. Также в многомерном течении реализуются постепенные рост и раскрытие трещины, что ведет к постепенной передаче энергии сжатого газа в УВ. Последнее обстоятельство не учитывается в одномерном расчете цилиндрического течения и также добавляет консерватизма в оценке параметров волн по упрощенной модели.

Несмотря на такое упрощение, одномерные расчеты полезны с точки зрения получения быстрых оценок и построения инженерных аппроксимационных зависимостей давления от расстояния. Такие зависимости, например, широко используются для воздушных ударных волн в сферической [10–19] и цилиндрической геометрии [1]. Для цилиндрической ударной волны в воде такие зависимости отсутствуют, хотя существует необходимость в таких соотношениях, например при проведении серийных расчетов при анализе риска, когда моделируется множество — до десятков и даже сотен тысяч различных ситуаций.

С другой стороны, как уже отмечалось выше, существует необходимость оценок не только параметров падающих волн в воде, но и параметров волн на выходе из нее при различных обстоятельствах. В работе также рассматривается и этот вопрос.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается ситуация расширения цилиндрического объема сжатого метана. Как уже отмечалось выше, задача решается в одномерной постановке. Для описания течения используется система уравнений газодинамики, выражающих законы сохранения массы, импульса и энергии в лагранжевых массовых координатах:

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

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

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

В качестве уравнения состояния для газовых сред (метан, воздух) использовалось уравнение состояния идеального газа:

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

Для конденсированных сред используется уравнение состояния в виде

$$p = p_0 + c^2(p - p_0). \quad (5)$$

В формулах (1)–(5) t — время; r — радиус; m — лагранжева массовая координата; V — удельный объем; ρ — плотность; p — давление; u — скорость; i — удельная внутренняя энергия; γ — показатель адиабаты, равный 1.4 для воздуха и 1.32 для метана; ρ_0 — плотность конденсированных сред при давлении $p_0 = 101\,325$ Па (для воды $\rho_0 = 1000$ кг/м³, для стали $\rho_0 = 7800$ кг/м³); c — скорость звука в конденсированной среде (для воды $c = 1\,500$ м/с, для стали $c = 5000$ м/с).

Начальное состояние для трубопровода задавалось бесконечным цилиндром с радиусом $R_0 = 0.5$ м. Метан в этом объеме сжат до давления $P_0 = 10.1$ МПа. Температура воды и метана полагалась равной $T_0 = 273$ К, давление в воде $P_{sur} = 101\,325$ Па (гидростатическое давление не учитывалось). На удалении от трубопровода задавалось граничное условие покоящейся среды с давлением в 1 атм.

Поскольку решение данной задачи можно рассматривать и с точки зрения ее приложения к оценке параметров ударных волн при аварийных разрывах газопроводов, проложенных по дну, то в этом случае следует учесть и тот факт, что волна распространяется в полупространстве. В связи с этим используемый в постановке задачи радиус R_0 реального трубопровода должен увеличиваться в расчете в $\sqrt{2}$ раз.

В расчетах не учитываются потери энергии на такие процессы, как разрушение стенок трубопровода, метание его фрагментов, поглощение энергии в подстилающем грунте. Неучет этих потерь энергии ведет к завышению рассчитываемых давлений на фронте УВ.

Описанная постановка задачи может с оговорками использоваться и для оценки параметров волн при выходе их из воды. Понятно, что в реальных ситуациях волна в водной среде в какой-то момент времени выходит на поверхность и переходит в воздух или находящуюся на поверхности другую среду. Обычно такая ситуация может возникать при нахождении плавсредства вблизи места разрыва подводного газопровода. В этом случае волна взаимодействует с дном судна, обычно стальным.

Для моделирования таких ситуаций в общем случае трехмерного течения можно использовать упрощенный подход, когда цилиндрическая волна выходит на соответствующие контактные поверхности. На больших радиусах кривизны таких поверхностей из одномерного моделирования взаимодействия с ними волны, приходящей из воды, можно получить представление о параметрах течения в окрестности контактных разделов на начальной стадии такого взаимодействия. Знание этих параметров позволяет оценить возникающие опасности при выходе УВ из воды.

В данной работе глубина подводного прохождения трубопровода была выбрана равной 20 м. Именно на таком расстоянии в соответствующих задачах задавалась контактная поверхность “вода–воздух” или “вода–сталь”. Слой стали толщиной 25 мм разделяет воду и воздух и имитирует дно судна. Система уравнений (1)–(5) с соответствующими начальными условиями решалась численно с использованием разностных методов [20–24].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ПАРАМЕТРОВ УВ В ВОДЕ ПРИ РАЗРЫВЕ ГАЗОПРОВОДА

Численные расчеты проводились на разностной сетке с шагом $h = 7$ мм для области сжатого газа и $h = 20$ мм для воды. Размер расчетной области составлял 100 м по радиусу. Этому расстоянию соответствовали избыточные давления на фронте УВ в несколько десятков кПа.

На рис. 1 показаны зависимости давления от расстояния в различные моменты времени. На этом же рисунке приведены аналогичные зависимости для волн в случае разрыва газопровода в воздухе. Очевидным фактом, отражаемым на рис. 1, является большая скорость УВ в воде. Но из рис. 1 также видно, что УВ в воде имеет профиль, отличающийся от привычных профилей воздушных

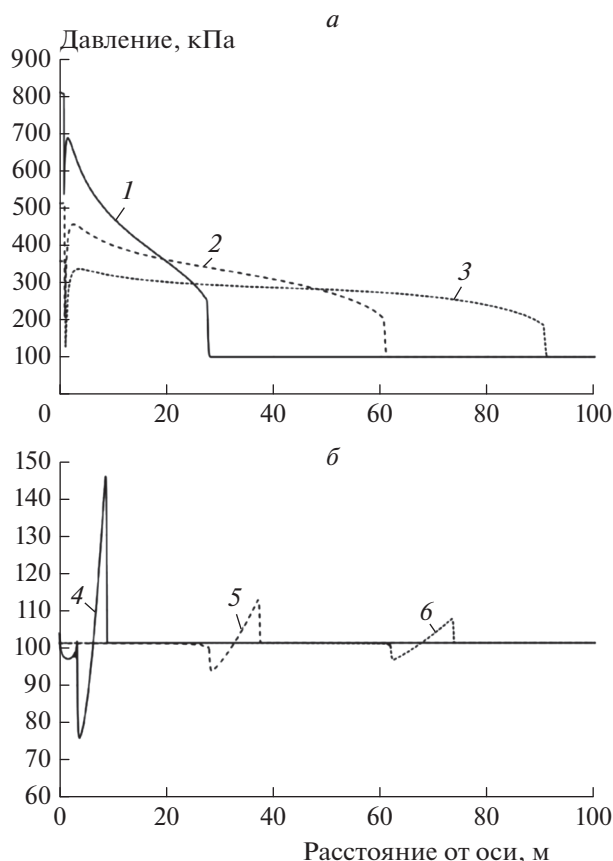


Рис. 1. Зависимости давления от расстояния при расширении цилиндрического объема сжатого метана в воде (а) и в воздухе (б) в различные моменты времени, мс: 1 – 18, 2 – 40, 3 – 60, 4 – 18.5, 5 – 99, 6 – 206.

УВ. В воздушной УВ за фронтом имеется характерный спад от волны разрежения. В УВ в воде такой спад отсутствует – за фронтом УВ в целом наблюдается плато с некоторым повышением давления. Это повышение хорошо заметно на временных зависимостях давления на различных расстояниях, представленных на рис. 2. Из этого рисунка видно, что после скачка давления на фронте волны, приходящей в точку УВ, не происходит спада давления, как в воздушной УВ. Наоборот, наблюдается некоторое нарастание давления, а за фронтальным скачком – характерный “горб”. Последний обусловлен слабой сжимаемостью воды в сочетании с цилиндрической геометрией течения (при сферических волнах он отсутствует). В цилиндрической волне хотя и существует расхождение необходимого для формирования волны разрежения ослабления скорости потока за УВ. Как видно из рис. 3, где представлены распределения скорости по пространству в различные моменты времени, скорость непосредственно за фронтом нарастает причем достаточно быстро: в результа-

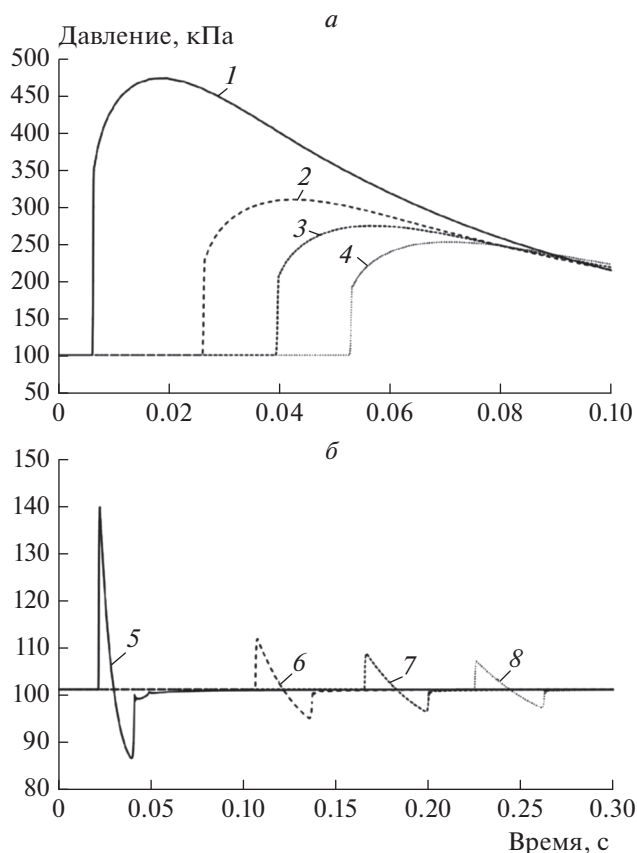


Рис. 2. Зависимость давления от времени на различных расстояниях от оси газопровода при расширении цилиндрического объема сжатого метана в воде (а) и в воздухе (б): 1, 5 – 10 м; 2, 6 – 40 м; 3, 7 – 60 м; 4, 8 – 80 м.

те спад давления при расхождении потока за счет цилиндрической геометрии компенсируется с избытком набегающим потоком позади УВ.

Следует при этом отметить, что скорость движения среды за ударной волной в воде крайне невелика: в рассматриваемом примере с расстояния 7 м от оси газопровода скорость падает до значения, составляющего менее 1 м/с. Что гораздо меньше скорости за воздушной УВ в аналогичной ситуации (см. рис. 3б), при том что давления, достигаемые в УВ в воде, заметно выше давлений разрыва газопровода в воздухе, что видно из рис. 4.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ПАРАМЕТРОВ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ВОЗДУХЕ ПРИ ВЫХОДЕ ЕЕ НА ПОВЕРХНОСТЬ ВОДЫ

При выходе УВ на поверхность водная среда, сжатая УВ, разгружается в воздух. При этом в воздухе формируется ударная волна, а в воде – волна разрежения. Характерные распределения давления и скорости потока по пространству для такой ситуации и нескольких моментов времени представлены на рис. 5. Из рис. 5а, б видно, что при выходе УВ от разрыва рассматриваемого трубо-

провода с глубины 20 м в воздухе формируется волна крайне незначительной амплитуды, ~1 кПа; скорость движения свободной поверхности воды при этом составляет около 0.3 м/с. Такие невысокие параметры течения обусловлены существенной разницей (более чем на три порядка) в акустической жесткости сред (произведении скорости звука на плотность среды). На рис. 6 (штриховые линии) представлены распределения максимально достигаемого давления. Из рис. 5, 6 можно сделать вывод и о длительности действия волны на поверхности: она составляет порядка 30 мс по времени движения вверх. За такие времена значительный подъем водной поверхности с реализующимися скоростями движения свободной поверхности практически исключается, что исключает и возможность формирования на этой поверхности высоких и сильных волн.

Полученные в расчете величины позволяют сделать вывод о том, что даже при сравнительно небольшой глубине прохождения газопровода (20 м) поражающие действия над поверхностью воды исключаются: как действие давления, так и действие волны нахлеста жидкости незначительно.

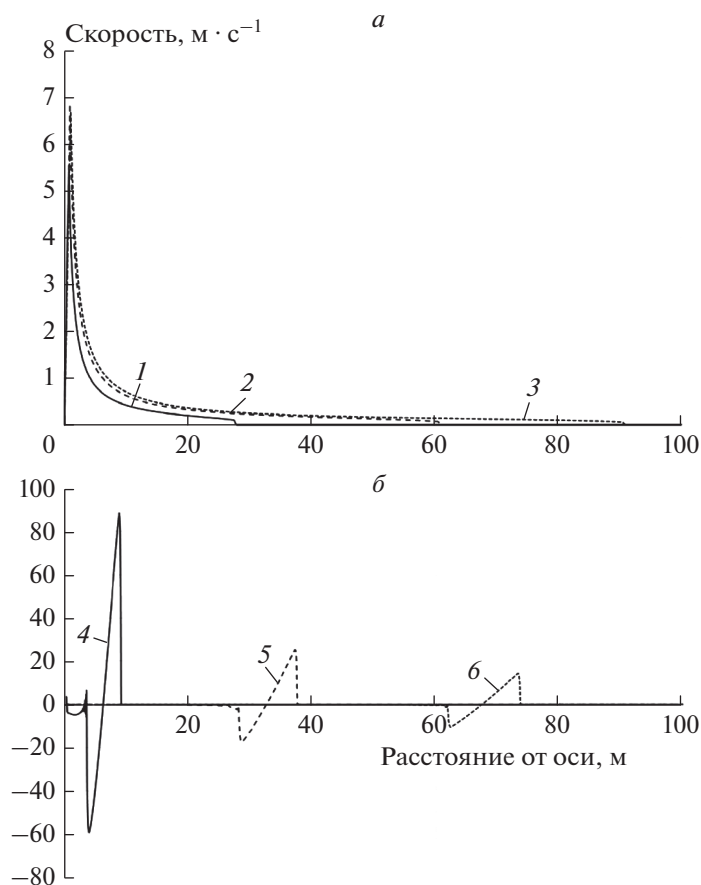


Рис. 3. Зависимость скорости в воде от расстояния при расширении цилиндрического объема сжатого метана в воде (а) и в воздухе (б) в различные моменты времени, мс: 1 – 18, 2 – 40, 3 – 60, 4 – 18.5, 5 – 99, 6 – 206.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ПАРАМЕТРОВ УВ В СТАЛЬНОМ ЛИСТЕ

Аналогично расчетам выхода ударной волны из воды в воздух были проведены расчеты выхода

такой же волны в воздух через стальной лист. На рис. 5а показаны профили давления при таком процессе для нескольких моментов времени. Как видно из этого рисунка (линии 2), в стальном ли-

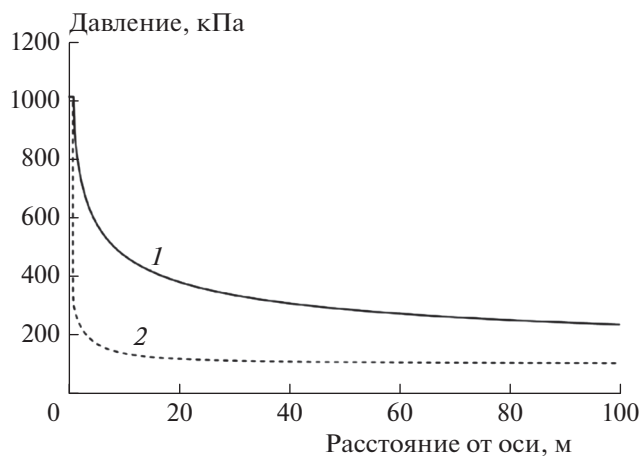


Рис. 4. Зависимость максимально достигаемого давления от расстояния при расширении цилиндрического объема сжатого метана в воде (сплошная кривая) и в воздухе (штриховая кривая).

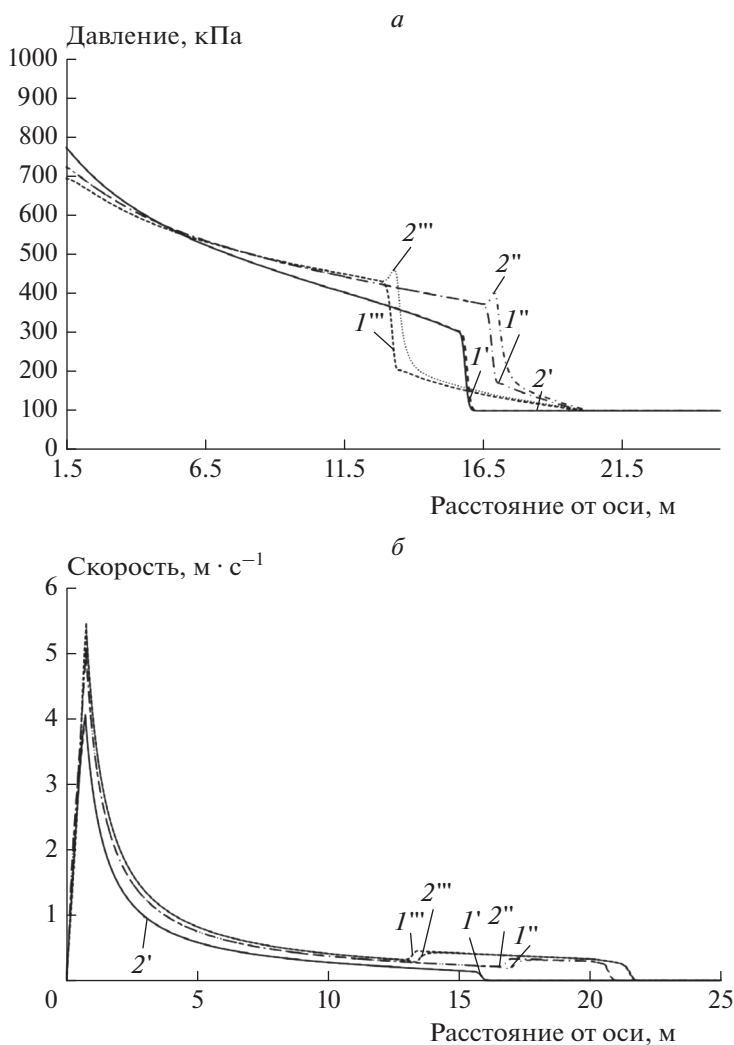


Рис. 5. Зависимости давления (а) и скорости (б) от расстояния при расширении цилиндрического объема сжатого метана и переходе волны из воды в воздух (кривые 1) и переходе волны из воды в воздух через слой стали (кривые 2) в различные моменты времени: 1', 2' – 10 мс; 1'', 2'' – 15.0 мс; 1''', 2''' – 17.4 мс.

сте давления не достигают существенных величин ни при сжатии, ни при растяжении (все величины лежат в пределах нагружающих давлений). После же прохождения волной слоя стали и выходе ее в воздух давление резко падает. Величины максимально достигаемых давлений в таком процессе отображены на рис. 6 (сплошные линии). Как видно из этого рисунка, прохождение волны через слой стали не создает разрушающих воздействий в воздухе (избыточные давления в воздушной ударной волне составляют около 1 кПа). Наконец, из расчетов следует, что скорость движения свободной поверхности “сталь–воздух” невелика (≈ 0.2 м/с, см. рис. 5б, линии 2) и за время этого движения (≈ 25 мс в данной задаче) максимальное смещение этой поверхности не вызовет критических деформаций стального листа.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена задача о разрыве подводного газопровода с генерацией в воде ударных волн цилиндрической геометрии. С помощью численного моделирования в одномерном приближении показано, что структура цилиндрической УВ отлична от привычной картины течения в воздушных УВ: в цилиндрической УВ в воде скорость потока непосредственно за фронтом не падает, а нарастает. В результате такого скоростного напора на временных зависимостях давления, в точке после скачка давления на фронте возникает участок с его нарастанием и последующим спадом – характерный “горб”. Это объясняется невозможностью компенсации в цилиндрической геометрии УВ скоростного напора за

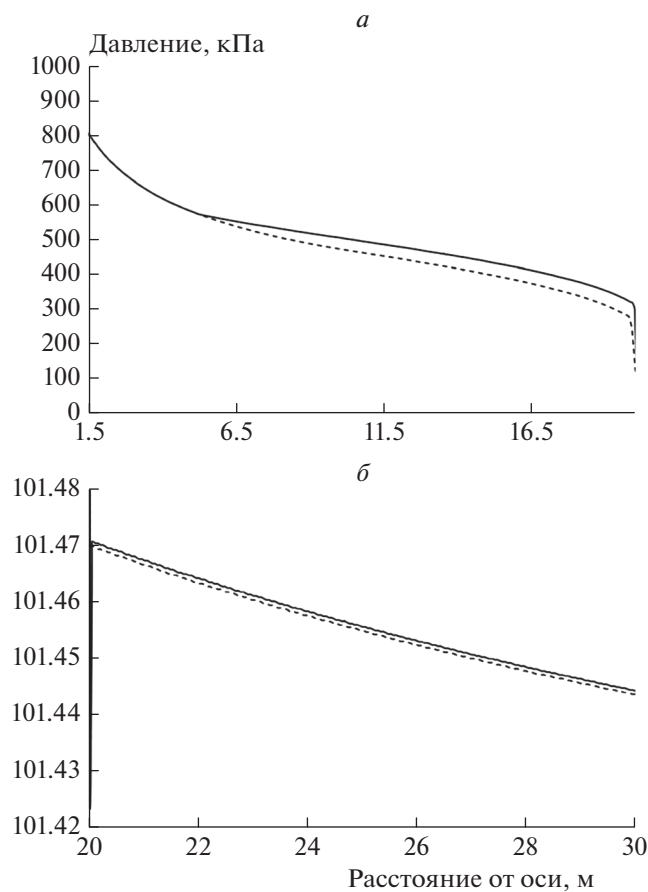


Рис. 6. Зависимость максимально достигаемого давления от расстояния при расширении цилиндрического объема сжатого метана и переходе волны из воды в воздух — до 20 м (а) и после 20 м (б), т.е. после выхода волны в воздух: штриховые линии — переход напрямую из воды в воздух, сплошные линии — переход из воды в воздух через ствольный лист.

фронтом расхождением потока за счет геометрического фактора.

При разрыве типового трубопровода ($R_0 = 0.5$ м, $P_0 = 10.1$ МПа) поражающие перепады давления на фронте УВ в воде существуют на больших по сравнению с воздушной УВ расстояниях. Таким образом, одинаковая энергия сжатого газа создает более мощные по сравнению с воздухом цилиндрические УВ в воде.

В то же время показано, что выход даже сильных УВ на поверхность воды не создает угрозы поражающего действия ни воздушной волной, ни водяным всплеском. Также в рассмотренных случаях не возникает поражения в стальных листах (имитация бортовой обшивки судов) при воздействии на них УВ, сгенерированных в модельной ситуации разрушения газопровода. Условия для отколов и значительных деформаций не возникают.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сумской С.И., Софьин А.С., Зайнетдинов С.Х., Агапов А.А. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 8. С. 28.
2. Агапов А.А., Софьин А.С., Сумской С.И., Зайнетдинов С.Х. // Сб. науч. тр. VI Междунар. конф. "Лазерные, плазменные исследования и технологии — ЛАПАЗ-2020". М.: НИЯУ МИФИ, 2020. С. 446.
3. Софьин А.С., Сумской С.И., Зайнетдинов С.Х. // Там же. С. 462.
4. Замышляев Б.В., Яковлев Ю.С. Динамические нагрузки при подводном взрыве. Л.: Судостроение, 1967.
5. Коул Р. Подводные взрывы. М.: Изд-во иностр. лит., 1950.
6. Физика взрыва. Т. 1. М.: Физматлит, 2004.
7. Ганага С.В., Ковалёв С.А. // Применение методов математического моделирования и информатики для решения задач газовой отрасли: сб. науч. статей. М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2012. С. 148.
8. Сафонов В.С., Ганага С.В. // Вести газовой науки. 2013. № 3 (14). С. 212.
9. Сумской С.И., Зайнетдинов С.Х., Софьин А.С., Лисанов М.В., Агапов А.А. // Там же. 2020. № 3 (45). С. 72.
10. Садовский М.А. Физика взрыва. Сб. № 1 научно-исследовательских работ в области физики взрыва. М.: Изд-во АН СССР, 1952.
11. Адушкин В.В., Коротков А.И. // ЖПМТФ. 1961. № 5. С. 119.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. Braise W.C., Simpson D.W. // Loss Prevention. 1968. V. 2. P. 91.
16. Prugh R.W. // Proc. Intern. Conf. Vapor Cloud Modeling. Cambridge, MA, 1987. P. 712.
17. Harvey B.H. Second Report of the Advisory Committee on Major Hazards. London: HM Stationery Office, 1979.
18. Harris R.J., Wickens M.J. Understanding Vapor Cloud Explosions — An Experimental Study. Comm. 1408. London: Inst. Gas Engineers, 1989.
19. Михалкин В.Н., Сумской С.И., Тереза А.М. и др. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 8. С. 3.
20. Сумской С.И., Софьин А.С., Зайнетдинов С.Х., Лисанов М.В., Агапов А.А. // Хим. физика. 2023. Т. 42. № 3. С. 63.
21. Борисов А.А., Гельфанд Б.Е., Губин С.А., Одинов В.В., Шаргатов В.А. // Хим. физика. 1986. Т. 5. № 5. С. 435.
22. Benson D.J. // Хим. физика. 2006. Т. 25. № 6. С. 70.
23. Гельфанд Б.Е., Губин С.А., Михалкин В.Н., Шаргатов В.А. // Хим. физика. 1984. Т. 3. № 3. С. 435.
24. Sumskoi S.I., Sofyin A.S., Agapov A.A., Zainetdinov S.Kh. // J. Phys.: Conf. Ser. V. 1686. 2020. C. 012085.