

УДК 534.222.2+533.6.011.72

## Оценка параметров ударных волн при разрушении морских и сухопутных участков магистральных газопроводов

С.И. Сумской<sup>1</sup>, С.Х. Зайнетдинов<sup>2</sup>, А.С. Софьин<sup>2</sup>, М.В. Лисанов<sup>2\*</sup>, А.А. Агапов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Российская Федерация, 115409, г. Москва, Каширское ш., д. 31

<sup>2</sup> ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», Российская Федерация, 105082, г. Москва, Переведеновский пер., д. 13, стр. 14

\* E-mail: risk@safety.ru

**Ключевые слова:** магистральный газопровод, разгерметизация, ударная волна, физический взрыв, распространение ударной волны под водой и в воздухе, численное моделирование, аппроксимационные формулы.

**Тезисы.** В статье рассмотрены различные подходы к расчету параметров ударных волн (у.в.) при разгерметизации газопроводов, в том числе следующие их недостатки: неучет протяженного характера трещины на месте разрушения, которая может иметь длину в несколько десятков диаметров трубопровода; использование параметров у.в., полученных для конденсированных взрывчатых веществ; использование результатов численного моделирования, выполненного более 30 лет назад с невысокой точностью. Исходя из этих предпосылок для оценки параметров у.в., образующихся при аварийном разрушении, предложено использовать одномерную модель на базе уравнений газодинамики в форме Лагранжа, а также аналитические соотношения, полученные путем аппроксимации результатов численных расчетов, выполненных для широкого диапазона диаметров трубопроводов и реализующихся на практике давлений в них. Представлены примеры расчетов параметров у.в. при разгерметизации магистрального газопровода, расположенного на суше, а также на глубине моря 40 м, с использованием рассмотренных методик. Для задачи с разрывом подводного трубопровода проанализировано влияние на параметры у.в. наличия у трубопровода бетонной оболочки. Показано, что, несмотря на консервативность принятых допущений, результаты расчетов по предложенным авторами методам позволяют получить более адекватные значения избыточного давления на фронте у.в., чем существующие аналоги.

Аварии с выбросом природного газа на магистральных газопроводах могут приводить к крайне тяжелым последствиям. Подобные аварии сопровождаются возникновением ударных волн (у.в.) в результате разрушения оболочки трубопровода и сепарации области сжатого газа с областью более низких давлений. Избыточное давление на фронте такой у.в. может достигать десятков и сотен килопаскалей и оказывать существенное поражающее воздействие на различные объекты и людей.

Особенностью данного процесса является то, что высокое давление в трубопроводе приводит к быстрому росту трещины, в результате чего она может иметь протяженность в несколько десятков исходных диаметров трубопровода<sup>1</sup>. Таким образом, на расстояниях, сопоставимых с длиной трещины, источник волны должен рассматриваться как линейный. Данная ситуация характерна и для морских, и для сухопутных трубопроводов. Основное отличие состоит в том, что в толще воды сжимаемость незначительна (в противоположность воздуху) и трещина будет расти с относительно меньшей скоростью за счет более высокого давления окружающей среды в месте разгерметизации. В результате в воде формируется волна сжатия с плавным нарастанием давления на фронте с последующим спадом.

Необходимо отметить, что в настоящее время отсутствуют рекомендации и инженерные подходы для определения параметров волн давления в воде при разрыве газопроводов, тем не менее аналогичные методики разработаны для сферических зарядов взрывчатых веществ [1, 2], существуют также работы, посвященные комплексному трехмерному численному моделированию разрыва подводных газопроводов [3, 4].

<sup>1</sup> См. Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах магистрального трубопроводного транспорта газа: руководство по безопасности: утв. приказом Ростехнадзора от 26 декабря 2018 г. № 647 – табл. 5.8.

Для сухопутных участков таких трубопроводов в отечественной практике анализа риска предлагается несколько подходов, а именно: в стандарте «Газпрома»<sup>2</sup> используются метод тротилового эквивалента и формула Садовского для волны сферической формы в безграничном пространстве [5]; переработанная версия этого подхода базируется на представлении взрыва в сферической симметрии [6]; РБ Г-05-039-96<sup>3</sup>, введенное в действие более 20 лет назад, содержит рекомендации по использованию модели Бейкера [7], имеющей существенные ограничения по дистанции применимости; Нидерландская организация прикладных научных исследований (*нидерл.* Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek, TNO) рекомендует [8] использовать непосредственно гидродинамические расчеты, а также зависимости, полученные Бейкером на основе численного решения уравнений гидродинамики. Указанные зависимости приведены для сферической у.в. Расчет у.в. от протяженных источников выполняется с помощью поправочных коэффициентов. В версии методики Бейкера [8] решена проблема с расчетом давления на больших дистанциях путем использования безразмерной кривой зависимости избыточного давления от расстояния для пентолита. Руководство Ростехнадзора<sup>1</sup> также содержит рекомендации по применению методов численного моделирования для решения таких задач.

Более поздние обзоры упрощенных подходов для оценки последствий физического взрыва [9, 10] упоминают две модели: модель Бейкера и помимо нее модель Пруга [11], основанную на тротиловом эквиваленте и появившуюся позже первой. При этом выявлено, что результаты расчета по модели Бейкера более консервативны даже на близких к источнику сферического взрыва расстояниях. В качестве недостатка модели Пруга следует отметить отсутствие рекомендаций по расчету последствий взрывов от протяженных источников.

Анализ показал, что единственной параметрической моделью, способной учитывать

специфику протяженной разгерметизации магистрального газопровода, является разработанная более 30 лет назад методика Бейкера [8], высокая консервативность которой отмечалась в различных работах. Поэтому перспективный способ оценки последствий физического взрыва магистрального газопровода – решение уравнений гидродинамики в частных производных. В наиболее полном объеме описать различные физические процессы, протекающие при разрыве трубопровода, можно, решая задачу в трехмерной постановке [3, 4, 12, 13]. Однако в настоящее время получение высокоточных решений на больших расстояниях от места взрыва с использованием подобных методов требует высоких вычислительных мощностей. Кроме того, для анализа риска [14, 15] нужны достаточно быстрые расчетные методы, так как приходится рассматривать большое количество потенциальных аварийных ситуаций. В этом смысле компромисс могут обеспечить одномерные гидродинамические расчеты. Их использование позволит учесть цилиндрическую симметрию задачи с разрывом магистрального газопровода, во всех деталях смоделировать движение у.в. в различных средах и получить решение с высокой точностью за относительно небольшое время. При этом на больших расстояниях сохранится некоторый консерватизм из-за неучета боковых разгрузок. Перспективной задачей также является разработка новых аналитических зависимостей для выполнения подобных расчетов.

#### Описание одномерной CFD<sup>4</sup> модели для расчета параметров ударных волн

Предлагаемый подход к моделированию генерации и распространения у.в. состоит в решении системы уравнений газодинамики в форме Лагранжа [16], не учитывающей тепловые составляющие потоков как не вносящие существенного вклада в условиях быстропротекающего процесса:

- уравнение неразрывности

$$V = -R^{\alpha-1} \frac{\partial R}{\partial M}; \quad (1)$$

- уравнение Эйлера

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -R^{\alpha-1} \frac{\partial P}{\partial M}; \quad (2)$$

<sup>2</sup> См. СТО Газпром 2-2.3-351-2009. Методические указания по проведению анализа риска на опасных производственных объектах газотранспортных предприятий ОАО «Газпром». – М.: Газпром экспо, 2009. – 378 с.

<sup>3</sup> См. РБ Г-05-039-96. Руководство по анализу опасности аварийных взрывов и определению параметров их механического действия: утв. Постановлением Госатомнадзора России от 31.12.1996 № 100.

<sup>4</sup> CFD – от *англ.* computational fluid dynamics (вычислительная гидродинамика).

- уравнение сохранения энергии

$$\frac{\partial \left( I + \frac{U^2}{2} \right)}{\partial t} = - \frac{\partial (R^{\alpha-1} P U)}{\partial M}, \quad (3)$$

где  $V$  – удельный объем,  $\text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$ ;  $R$  – радиальная эйлера координата, м;  $\alpha$  – коэффициент, равный 1, 2, 3 в плоском, осесимметричном и сферически симметричном случаях соответственно;  $M$  – лагранжева массовая координата,  $\text{кг} \cdot \text{м}^{\alpha-1}$ ;  $U$  – скорость,  $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $t$  – время, с;  $I$  – удельная внутренняя энергия,  $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$ ;  $P$  – давление, Па.

Система уравнений (1)–(3) замыкается уравнением состояния, характерным для моделируемой среды (газ, жидкость, твердое тело), и решается численно по явной разностной схеме «крест» [16]. Следует отметить, что в указанной постановке задачи заложен ряд консервативных допущений: во-первых, для газопроводов, лежащих либо на поверхности, либо на незначительном заглублении, часть энергии сжатого газа передается у.в., уходящей в грунт. Остальная энергия передается у.в., распространяющейся в полупространстве. В связи с этим радиус трубопровода, принимаемый в расчете, должен быть увеличен в  $\sqrt{2}$  раз. Во-вторых, считается, что вся энергия сжатого газа идет на формирование у.в. Потери энергии сжатого газа на разрушение оболочки трубопровода и метание грунта (при подземной прокладке трубопровода) не учитываются. В-третьих, допускается, что раскрытие трещины происходит мгновенно. Верификация описанной модели проводилась путем сравнения с результатами решения задач с помощью трехмерных гидродинамических кодов [4, 12], экспериментальными данными [17], аналитическим решением задачи о распаде разрыва.

Изложенный подход не противоречит практике многомерных расчетов, а в области определенных допущений и подтверждается ими. Учет конечности скорости раскрытия трещины незначительно влияет на достигаемые значения давлений на начальном участке распространения волны [4]. Это отражено на рис. 1, частично заимствованном у В.С. Сафонова и С.В. Ганаги [4, с. 217, рис. 6], где для сравнения приведены расчеты достигаемых в волне давлений для случая мгновенного и постепенного раскрытия трещины (трубопровод диаметром 42 дюйма под давлением 13 МПа). В первом случае

в указанном диапазоне расстояний фактически реализуются давления, соответствующие одномерной цилиндрической волне. Как показывает рис. 1, эта зависимость с небольшим консерватизмом завывает более реалистичные оценки действительно трехмерных расчетов с учетом эффекта раскрытия трещины.

Еще одним преимуществом одномерных расчетов является их более высокая точность, достигаемая благодаря выбору более мелкого шага по пространству; в многомерных расчетах такой мелкий шаг достижим не всегда. Для сравнения для мгновенного полного разрушения трубопровода приведена зависимость давления от обратного расстояния, посчитанная по рассматриваемой в данной работе одномерной модели (см. рис. 1). Сопоставляя два полученных разными методами решения фактически одной и той же задачи, можно убедиться, что давления при многомерных расчетах с недостаточно мелкой сеткой оказываются заниженными: при одних и тех же начальных данных красная линия (3D-расчет) в области больших обратных расстояний пролегает ниже зеленой (1D-расчет) (см. рис. 1).

В связи с этим надо понимать, что многомерные расчеты без гарантированного достижения достаточной точности способны вносить большую неопределенность в представления о параметрах у.в. Это можно проиллюстрировать еще одним примером. На рис. 2 представлены сравнительные результаты трех- и одномерных расчетов разрыва трубопровода

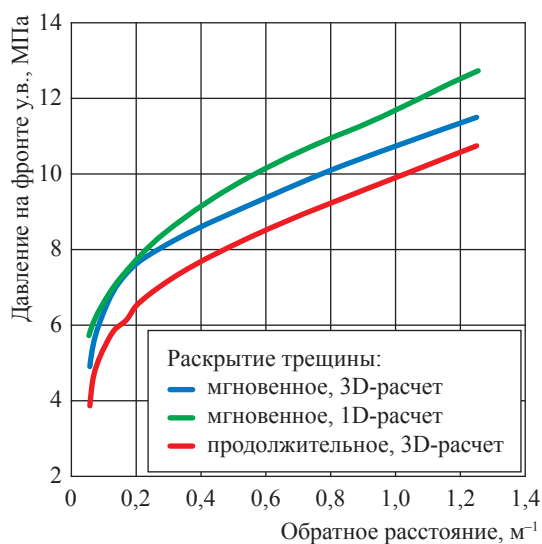


Рис. 1. Зависимости давления на фронте у.в. от обратного расстояния

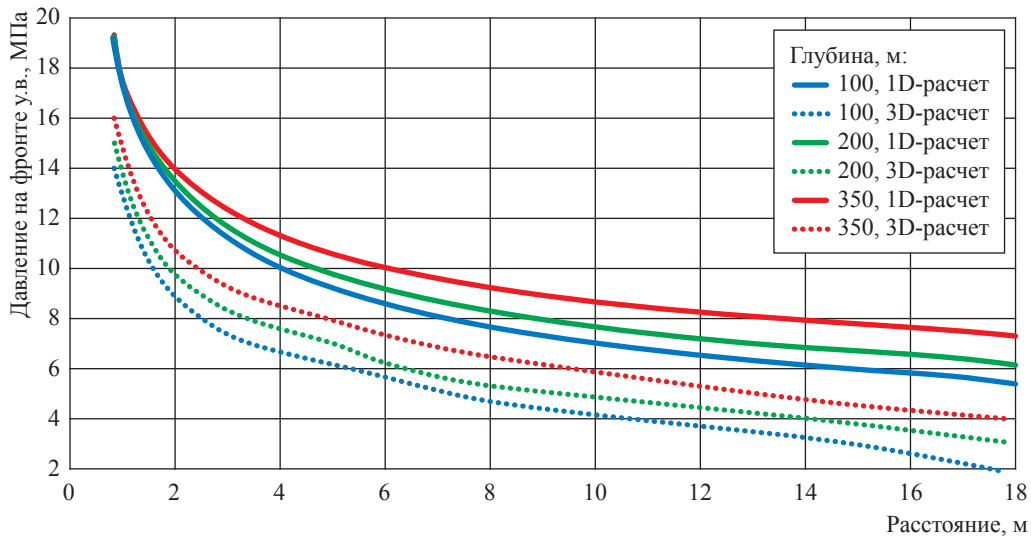


Рис. 2. Зависимости давления на фронте у.в. от расстояния, полученные с использованием трехмерных расчетов с учетом продолжительного раскрытия трещины [4, с. 218, рис. 7] и аналогичных одномерных расчетов для случая мгновенного раскрытия трещины

диаметром 42 дюйма, находящегося под давлением 20 МПа, на глубинах 100, 200 и 350 м. Наблюдаются заметные отличия графиков для одной глубины, построенных в 3D- и 1D-модели, что означает высокую степень неопределенности получаемых в многомерных расчетах у.в. результатов. Соответственно линии для одинаковых глубин на рис. 2 могут рассматриваться как нижняя (3D-расчеты) и верхняя (1D-расчеты) границы диапазона, в котором будут лежать истинные значения. Понятно, что одномерные расчеты дают завышенную оценку с возрастанием консерватизма по мере удаления от оси трубопровода.

Преодолеть неопределенность трехмерных расчетов можно за счет уменьшения разностного шага расчета до необходимых величин. Снизить консерватизм расчета по рассматриваемой в данной статье одномерной модели можно за счет учета скорости передачи энергии сжатого газа в окружающую среду.

### Аналитическая методика расчета избыточного давления на сухопутной части магистральных газопроводов и газопроводов высокого давления

С использованием рассмотренной одномерной модели проведены расчеты параметров у.в., возникающих при разрыве газопроводов диаметром от 0,2 до 1,4 м, работающих под давлениями от 0,4...50 МПа, и аппроксимированы аналитическими соотношениями, представленными ниже. Соотношения аппроксимируют три перечисленных далее характерных участка  $\bar{p}(\bar{r})$ , где  $\bar{p}$  – безразмерное давление на фронте ударной волны;  $\bar{r}$  – безразмерное расстояние от оси трубопровода<sup>5</sup>;  $P_0$  – давление в трубопроводе до аварии;  $P_a = 101325$  Па – атмосферное давление;  $R_0$  – радиус

трубопровода;  $E_g = \frac{(P_0 - P_a)\pi R_0^2}{\gamma - 1}$ ;  $\gamma$  – показатель адиабаты транспортируемого газа:

1) участок резкого спада давления и начала перехода энергии сжатого газа в энергию у.в.:

$$\bar{p}(\bar{r}) = k_1 \bar{r}^{-b} \quad \text{при } \bar{r}_1 \leq \bar{r} < \bar{r}_2; \quad (4)$$

<sup>5</sup> Перевод давления  $p$  и расстояния  $r$  в безразмерный вид  $\bar{p}$  и  $\bar{r}$  осуществляется по схеме, аналогичной соотношениям для  $\bar{p}_1$  и  $\bar{r}_1$ .

$$k_1 = \frac{\bar{p}_1}{\bar{r}_1^{b_1}}; b_1 = \ln\left(\frac{\bar{p}_2}{\bar{p}_1}\right) \ln^{-1}\left(\frac{\bar{r}_2}{\bar{r}_1}\right);$$

$$\bar{p}_1 = \bar{P}_0 = \frac{P_0}{P_a}; \bar{r}_1 = \frac{R_0}{\sqrt{\frac{E_g}{P_a}}};$$

$$\bar{p}_2 = 5 \cdot 10^{-7} \bar{P}_0^3 - 6,15 \cdot 10^{-4} \bar{P}_0^2 + 0,3072 \bar{P}_0 - 0,0277;$$

$$\bar{r}_2 = 0,3779 \bar{P}_0^{-0,482};$$

2) участок перехода основной доли энергии сжатого газа в у.в.:

$$\bar{p}(\bar{r}) = k_2 \bar{r}^{b_2} \text{ при } \bar{r}_2 \leq \bar{r} < \bar{r}_3; \quad (5)$$

$$b_2 = \ln\left(\frac{\bar{p}_3}{\bar{p}_2}\right) \ln^{-1}\left(\frac{\bar{r}_3}{\bar{r}_2}\right); k_2 = \frac{\bar{p}_2}{\bar{r}_2^{b_2}};$$

$$\bar{p}_3 = 0,3635; \bar{r}_3 = 2;$$

3) автомодельный участок:

$$\begin{aligned} \bar{p}(\bar{r}) = & -0,0003 \ln^5(\bar{r}) + 0,0064 \ln^4(\bar{r}) - 0,055 \ln^3(\bar{r}) + \\ & + 0,2445 \ln^2(\bar{r}) - 0,5946 \ln(\bar{r}) + 0,672, \text{ при } \bar{r}_3 \leq \bar{r} \leq 200. \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, соотношения (4)–(6) позволяют оценить давление в цилиндрической у.в. исходя из начальных параметров – давления в трубопроводе и его диаметра.

### Примеры расчетов избыточного давления на фронте у.в. для сухопутной нитки магистрального газопровода

Для магистрального газопровода DN1200, работающего под давлением 22,1 МПа, выполнена оценка избыточного давления на фронте у.в. (рис. 3). Разгерметизация газопровода происходила в месте его выхода на поверхность в районе технологической площадки. Длина разрушенного участка трубопровода принималась<sup>1</sup> равной 70 м. При численном одномерном моделировании в области нахождения трубопровода (области сжатого газа) использовался шаг расчетной сетки  $\approx 5$  мм, а за его пределами – 2 см.

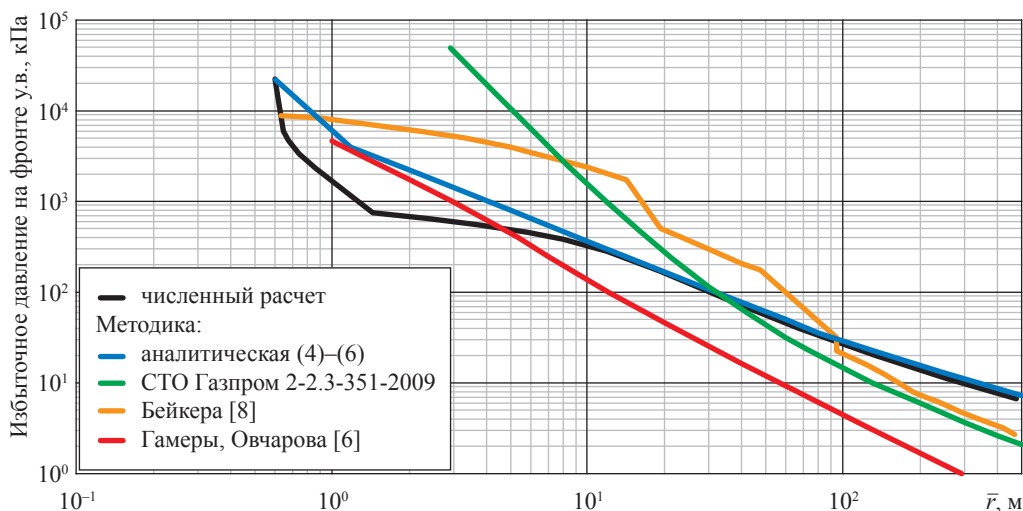


Рис. 3. Результаты расчета параметров у.в. при разрыве трубопровода с использованием различных методик

Результаты расчетов показывают высокую консервативность модели СТО Газпром 2-2.3-351-2009<sup>2</sup> на дистанциях до 30 м, что объясняется применением формулы Садовского для тротила, при взрыве которого достигаются существенно более высокие давления, чем те, которые используются при перекачке газа по трубопроводам. Указанный недостаток устранен в методике Ю.В. Гамеры и С.В. Овчарова [6]. В модели Бейкера [8] также предполагается корректировка давления в ближней от трубопровода зоне, однако используемые здесь зависимости определяют более медленный спад давления, в результате чего в некотором диапазоне расстояний методика демонстрирует наиболее консервативные по сравнению с другими подходами значения.

Более низкие по сравнению с другими методиками избыточные давления в моделях СТО Газпром 2-2.3-351-2009<sup>2</sup> и Ю.В. Гамеры и С.В. Овчарова [6] после  $r = 30$  м и  $r = 4$  м, соответственно, являются следствием допущения о сферической форме волны. Аналогичную по форме зависимость для  $r > 100$  м позволяет получить и методика Бейкера, несмотря на корректировку расчета специальными коэффициентами. Аналитические формулы (4)–(6) завышают значения давлений вблизи трубопровода, полученные численным расчетом, из-за трудности аппроксимации функции давления от расстояния на этом участке. Численный расчет, несмотря на принятые консервативные допущения, позволил получить наиболее низкие значения избыточного давления на начальном участке движения волны и более физически обоснованные на участке автомодельного решения, что объясняется более точным учетом протяженной формы источника у.в.

### Примеры расчетов избыточного давления на фронте у.в. для морской нитки магистрального газопровода

Как отмечалось выше, предлагаемый подход к решению уравнений гидродинамики может быть применен для расчета распространения у.в. и в более плотных средах, например в морской воде, бетонной оболочке трубопровода, грунте и т.д., при использовании соответствующих уравнений состояния.

Результаты расчетов параметров у.в. при разгерметизации трубопровода DN1200, работающего под давлением 22,1 МПа и расположенного на глубине моря 40 м, представлены

на рис. 4. Для демонстрации возможностей предложенного численного подхода рассматривались несколько моделей образования у.в. при разрушении трубопровода и контакте сжатого газа с водой: без учета стальной стенки (начальный момент времени); с учетом стальной стенки толщиной 10 мм без бетонной оболочки; при наличии стальной стенки и бетонной оболочки толщиной 10 см.

Учет стальной оболочки позволяет уточнить расчет на 5 % (по абсолютной величине давление снижается на 180 кПа), а бетонная оболочка уменьшает показатели давления на 2 % (90 кПа), однако, в масштабах аварии эти цифры представляются несущественными.

Для сравнения были также выполнены расчеты по аналитической методике [1, 2], разработанной для оценки последствий подводных взрывов заряда тротила сферической формы. Масса тротила принималась аналогично расчетам согласно рекомендациям СТО Газпром 2-2.3-351-2009<sup>2</sup> (см. предыдущий раздел). Для обеспечения более адекватных результатов на кривой зависимости давления от расстояния до поверхности моря определялась точка, в которой давление на фронте у.в. соответствовало давлению в трубопроводе. Эта точка условно переносилась к краю трубопровода, и в дальнейших вычислениях участвовала часть кривой, расположенная справа от этой точки.

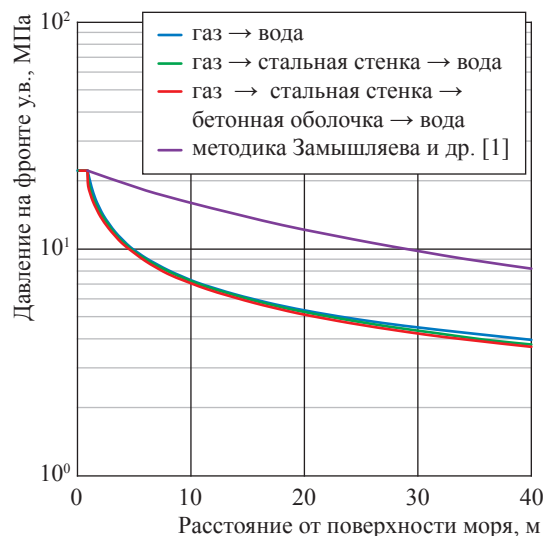


Рис. 4. Максимальное давление на фронте у.в. при разгерметизации подводного участка магистрального газопровода на глубине 40 м на различных расстояниях до поверхности моря

Результаты демонстрируют консервативность модели тротилового эквивалента даже при использовании допущения о сферической симметрии у.в. и введенных корректировках. Таким образом, численное моделирование позволяет получить более адекватные результаты в случае подводных взрывов.

\*\*\*

Анализ подходов к оценке параметров у.в., генерируемых при разрывах газопроводов, выявил их основные недостатки: неучет протяженного характера разрыва трубопровода, длина которого может в десятки раз превышать его диаметр; использование значений параметров у.в., полученных для конденсированных взрывчатых веществ; использование результатов численного моделирования, выполненного более 30 лет назад и не пересматриваемого с тех пор с учетом современных возможностей вычислительной техники.

Для решения задачи предложена одномерная модель, базирующаяся на уравнениях газодинамики в форме Лагранжа. Представлены аналитические соотношения для расчетов параметров ударных волн в воздушной среде при разгерметизации газопроводов, полученные путем аппроксимации результатов численных расчетов с использованием одномерной модели. При разработке аналитических

соотношений выявлены и учтены основные стадии распространения у.в.: первая – резкого падения давления; вторая – перехода основной части энергии сжатого газа в у.в.; третья – авто-модельная.

Приведены примеры расчетов распространения у.в. при разрыве сухопутных и морских участков магистрального газопровода, которые показали, что методика позволяет получить более адекватные и наименее консервативные оценки по сравнению с другими моделями. Также в качестве примера рассмотрена задача о влиянии оболочки морского трубопровода на параметры у.в.

Предложенная модель с наибольшей точностью позволяет без существенных затрат рассчитывать давления на расстояниях порядка длины раскрытия трубопровода, что придает ей дополнительную ценность, поскольку именно высокие давления могут оказывать наиболее негативное воздействие. В частности, для подводных трубопроводов модель может с некоторым консерватизмом использоваться для глубин моря до нескольких десятков метров.

Подходы, представленные в статье, соответствуют рекомендациям Руководства по безопасности Ростехнадзора<sup>1</sup> и могут быть использованы для расчета последствий аварий и количественной оценки риска аварий на опасных производственных объектах транспорта газа.

## Список литературы

1. Замышляев Б.В. Динамические нагрузки при подводном взрыве / Б.В. Замышляев, Ю.С. Яковлев. – Л.: Судостроение, 1967. – 367 с.
2. Коул Р. Подводные взрывы / Р. Коул. – М.: Изд-во иностр. лит., 1950. – 495 с.
3. Ганага С.В. Моделирование аварийного разрыва газопровода на подводном переходе / С.В. Ганага, С.А. Ковалёв // Применение методов математического моделирования и информатики для решения задач газовой отрасли: сб. науч. ст. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2012. – С. 148–155. – (Вести газовой науки).
4. Сафонов В.С. Моделирование физических эффектов при аварийных разрывах подводных газопроводов / В.С. Сафонов, С.В. Ганага // Вести газовой науки. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2013. – № 3 (14): Современные подходы и перспективные технологии в проектах освоения нефтегазовых месторождений российского шельфа. – С. 212–219.
5. Физика взрыва: в 2 т. / под ред. Л.П. Орленко. – 3-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2004. – Т. 1. – 832 с.
6. Гамера Ю.В. Модель образования и распространения первичной воздушной ударной волны при аварии оборудования, находящегося под высоким давлением / Ю.В. Гамера, С.В. Овчаров // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – № 12. – С. 74–78.
7. Бейкер У. Взрывные явления. Оценка и последствия: в 2 кн. / У. Бейкер, П. Кокс, П. Уэстайн и др. – М.: Мир, 1986.
8. Methods for the calculation of physical effects. Yellow Book. – 3<sup>rd</sup> ed., 2<sup>nd</sup> revised print. – Hague, Netherlands: Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek, 2005. – URL: <https://content.publicatierEEKSgevaarlijkstoffenn.nl/documents/PGS2/PGS2-1997-v0.1-physical-effects.pdf>. – (PublicatierEEKS Gevaarlijke Stoffen. – № 2).

9. Bubbico R. Analysis and comparison of calculation methods for physical explosions of compressed gases / Roberto Bubbico, Barbara Mazzarotta // *Chemical Engineering Transactions*. – 2013. – Т. 32. – С. 133–138. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1099/1/012014/pdf>. – DOI: 10.1088/1742-6596/1099/1/012014
10. Pasha M. Physical explosion analysis in heat exchanger network design / M. Pasha, D. Zaini, A.M. Shariff // *Earth and Environmental Science*. – 2016. – № 36. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/36/1/012005/pdf>. – (IOP Conf. Series).
11. Prugh R.W. Quantitative evaluation of “Bleve” hazards / R.W. Prugh // *Journal of Fire Protection Engineering*. – 1991. – Т. 3. – № 1. – С. 9–24.
12. Шаргатов В.А. Верификация модели распространения волн избыточного давления программного комплекса ТОХИ+CFD / В.А. Шаргатов, С.И. Сумской, А.С. Софьин // *Безопасность труда в промышленности*. – 2018. – № 5. – С. 44–52.
13. Shargatov V.A. Modeling of shock wave propagation over the obstacles using supercomputers / V.A. Shargatov, A.S. Pecherkin, A.S. Sofyin, et al. // *Journal of Physics: Conf. Series*. – 2018. – Т. 1099. – Ст. № 012014. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1099/1/012014/pdf>
14. Пчельников А.В. Оценка риска аварий на объектах хранения и перевалки нефти и нефтепродуктов / А.В. Пчельников, А.И. Гражданкин, И.А. Кручинина и др. // *Безопасность труда в промышленности*. – 2004. – № 6. – С. 33–37.
15. Сумской С.И. Анализ риска аварий на магистральном трубопроводе, транспортирующем широкую фракцию легких углеводородов / С.И. Сумской, А.В. Пчельников, Е.Л. Шанина и др. // *Безопасность труда в промышленности*. – 2007. – № 2. – С. 48–52.
16. Мейдер Ч. Численное моделирование детонации = Numerical modeling of detonations: пер. с англ. / Ч. Мейдер. – М.: Мир, 1985. – 384 с.: ил.
17. Boyer D.W. An experimental study of the explosion generated by a pressurized sphere / D.W. Boyer // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1960. – Т. 9. – № 3. – С. 401–429.

## Assessment of shock wave parameters at rupture of onshore and offshore sections of gas mains

S.I. Sumskey<sup>1</sup>, S.Kh. Zaynetdinov<sup>2</sup>, A.S. Sofin<sup>2</sup>, M.V. Lisanov<sup>2\*</sup>, A.A. Agapov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Bld. 31, Kashirskoye shosse, Moscow, 115409, Russian Federation

<sup>2</sup> CJSC «Scientific technical center of industrial safety problems research», Block 14, Bld. 13, Perevedenovskiy pereulok, Moscow, 105082, Russian Federation

\* E-mail: [risk@safety.ru](mailto:risk@safety.ru)

**Abstract.** The article discusses various approaches to calculating parameters of a shock wave during depressurization of gas pipelines. A number of disadvantages are noted, such as: neglect of extended character of a crack at a fracture site, which can have a length of several tens of pipeline diameters; exploitation of the shock wave parameters values obtained for cases of condensed explosions; and operating results of numerical simulation performed more than 30 years ago with low accuracy. Based on these assumptions, authors suggest to apply a one-dimensional model based on the equations of gas dynamics in the form of Lagrange, as well as analytical relationships obtained by approximating the results of numerical calculations performed for a wide range of pipeline diameters and pressures implemented in practice; to estimate parameters of a shock wave produced during rupture. The article presents examples of calculating shock wave parameters during depressurization of a main gas pipeline located on land, as well as at water depth of 40 m by means of the considered methods. For rupture of an underwater pipeline, the effect of a concrete pipeline shell on the shock wave parameters is studied. Comparison showed that, despite the conservatism of the assumptions made, authors' calculation procedure provides more adequate values of overpressure at the shock front than existing analogues.

**Keywords:** trunk gas pipeline, depressurization, shock wave, physical explosion, sub-water and in-air propagation of a shock wave, numeric simulation, approximation formulae.

### References

1. ZAMYSHLYAYEV, B.V., Yu.S. YAKOVLEV. *Dynamic loads during an underwater explosion* [Dinamicheskiye nagruzki pri podvodnom vzryve]. Leningrad, USSR: Sudostroyeniye, 1967. (Russ.).



2. COLE, Robert H. *Underwater explosions* [Podvodnyye vzryvy]. Translated from Engl. Moscow: Izdatelstvo inostrannoy literatury, 1950. (Russ.). Originally published by Princeton University Press in 1948.
3. GANAGA, S.V., S.A. KOVALEV. Modeling an accident gas pipeline rupture in a subsea crossing [Modelirovaniye avaryinogo razryva gazoprovoda na podvodnom perekhode]. In: *Application of mathematical modeling and information methods to solve gas industry problems*: collection of sc. articles. Moscow: Gazprom VNIIGAZ LLC, 2012, pp. 148–155. (Russ.).
4. SAFONOV, V.S., S.V. GANAGA. Modeling of physical effects in case of emergency disruptions of underwater pipelines [Modelirovaniye fizicheskikh effektov pri avaryinykh razryvakh podvodnykh gazoprovodov]. *Vesti Gazovoy Nauki*. Moscow: Gazprom VNIIGAZ LLC, 2013, no. 3 (14): Modern approaches and advanced technologies in projects of development of Russian offshore oil-and-gas fields, pp. 212–219. ISSN 2306-8949. (Russ.).
5. ORLENKO, L.P. (ed.). *Physics of explosion* [Fizika vzryva]: in 2 vls. 3<sup>rd</sup> ed., revised. Moscow: Fizmatlit, 2004, vol. 1. (Russ.).
6. GAMERA, Yu.V., S.V. OVCHAROV. Model of formation and evolution of primary blast wave at emergency of equipment under high pressure [Model obrazovaniya i rasprostraneniya pervichnoy udarniy volny pri avarii oborudovaniya, nakhodyshchegosya pod vysokim davleniyem]. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti*, 2012, no. 12, pp. 74–78. ISSN 0409-2961. (Russ.).
7. BAKER, W.E., P.A. COX, P.S. WESTINE. *Explosion hazards and evaluation* [Vzryvnyye yavleniya. Otsenka i posledstviya]. Translated from Engl. Moscow: Mir, 1986. (Russ.). Originally published by Elsevier, Amsterdam, in 1983.
8. Methods for the calculation of physical effects. Yellow Book [online]. 3<sup>rd</sup> ed., 2<sup>nd</sup> revised print. Hague, Netherlands: The Netherlands Organization for Applied Scientific Research, 2005. *Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen*, no. 2. Available from: <https://content.publicatiereeksgevaarlijkkestoffen.nl/documents/PGS2/PGS2-1997-v0.1-physical-effects.pdf>
9. BUBBICO, R., B. MAZZAROTTA. Analysis and comparison of calculation methods for physical explosions of compressed gases. *Chemical Engineering Transactions*, 2013, vol. 32, pp. 133–138. ISSN 1974-9791.
10. PASHA, M., D. ZAINI, A.M. SHARIFF. Physical explosion analysis in heat exchanger network design [online]. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2016, no. 36. ISSN 1755-1307. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/36/1/012005/pdf>
11. PRUGH, R.W. Quantitative evaluation of “Bleve” hazards. *Journal of Fire Protection Engineering*, 1991, vol. 3, is. 1, pp. 9–24. ISSN 1042-3915.
12. SHARGATOV, V.A., S.I. SUMSKOY, A.S. SOFIN. Verification of a TOXI+CFD simulator for modelling of propagation of overpressure waves [Verifikatsiya modeli rasprostraneniya voln izbytochnogo davleniya programmnogo kompleksa TOXI+CFD]. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti*, 2018, no. 5, pp. 44–52. ISSN 0409-2961. (Russ.).
13. SHARGATOV, V.A., A.S. PECHERKIN, A.S. SOFYIN, et al. Modeling of shock wave propagation over the obstacles using supercomputers [online]. *Journal of Physics: Conf. Series*, 2018, vol. 1099, no. 012014. ISSN 1742-6596. DOI: 10.1088/1742-6596/1099/1/012014. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1099/1/012014/pdf>
14. PCHELNIKOV, A.V., A.I. GRAZHDANKIN, I.A. KRUCHININA, et al. Assessment of emergency risk at facilities for storage and transfer of oil and oil products [Otsenka riska avaryi na obyektakh khraneniya i perevalki nefri i nefteproduktov]. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti*, 2004, no. 6, pp. 33–37. ISSN 0409-2961. (Russ.).
15. SUMSKOY, S.I., A.V. PCHELNIKOV, Ye.L. SHANINA, et al. Analysis of emergency risk at a trunk gas pipeline transmitting wide spread of light hydrocarbons [Analiz riska avaryi na magistralnom truboprovode, transportiruyushchem shirokuyu fraktsiyu legkikh uglevodorodov]. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti*, 2007, no. 2, pp. 48–52. ISSN 0409-2961. (Russ.).
16. MADER, Charles L. *Numerical modeling of detonations* [Chislennoye modelirovaniye detonatsii]. Translated from Engl. Moscow: Mir, 1985. (Russ.). Originally published by University of California Press in 1979.
17. BOYER, D.W. An experimental study of the explosion generated by a pressurized sphere. *Journal of Fluid Mechanics*, 1960, vol. 9, no. 3, pp. 401–429. ISSN 0022-1120.