

УДК 614.8

## РАСЧЕТ ОПАСНЫХ ЗОН ВЗРЫВА ЕМКостей С СЖИЖЕННЫМ ГАЗОМ

*О. С. Головатая, А. П. Петраков, С. В. Шилов*

В работе проведено моделирование поражающего действия ударной волны при взрыве сжиженного газа. Внесены поправки в нормативную методику расчета. Рассмотрены случаи транспортирования газов в автомобильных цистернах и их стационарного размещения. Приведен способ оценки опасных зон промышленных зданий.

*Ключевые слова:* ударная волна, поражение, сжиженный газ.

Применение математического моделирования и современных информационных технологий с достаточной точностью позволяет предсказать последствия техногенных аварий. Не является исключением и такой опасный сценарий, как взрыв сжиженного газа при разгерметизации автоцистерн. На сегодняшний день они широко используются для перевозки и заправки емкостей на газовых автомобильных заправках. Причем потребление газа ввиду его экономичности и экологичности все более возрастает [4].

На сегодняшний день в автомобилях широко используются пропан-бутановые смеси, обладающие значительными пожаро- и взрывоопасными свойствами. Поэтому проведение моделирования аварии с их участием особенно актуально.

Проведем оценку факторов ударной волны. При этом рассчитываются максимально возможные стехиометрические параметры (на практике они, как правило, меньше). Не учитываются такие эффекты, как экранировка волны зданиями и снос газоздушного облака ветром.

В качестве исходных данных рассмотрим, что используется пропан-бутановая смесь в зимнем варианте (75 % пропана и 25 % бутана), что характерно для регионов с холодным климатом [4]. Рассчитаем взрыв

на дороге при транспортировке или в стационарном месте типичных емкостей автоцистерн, а именно 5,07, 10, 20, 31, 45, 50 м<sup>3</sup> [1].

Моделирование поражающих факторов проведем согласно [5]. В данной методике решаются две задачи: первая – расчет параметров взрыва ТВС (топливно-воздушной смеси), таких как избыточное давление и импульс на определенном расстоянии от эпицентра аварии с оценкой вероятности повреждений промышленных зданий и поражения людей. Вторая задача – оценка радиусов зон различной степени поражения ударной волной людей и повреждений промышленных зданий.

Расчет основных параметров взрыва ТВС начинаем с определения эффективного энергозапаса ТВС:

$$E = M_{\Gamma} \cdot q_{\Gamma} \text{ при } C_{\Gamma} \leq C_{\text{ст}} \text{ или } E = M_{\Gamma} \cdot q_{\Gamma} \cdot C_{\text{ст}}/C_{\Gamma} \text{ при } C_{\Gamma} > C_{\text{ст}}, \quad (1)$$

где  $M_{\Gamma}$  – масса горючего вещества, содержащегося в облаке ТВС, кг (определяется исходя из условий развития аварии),  $q_{\Gamma}$  – теплота сгорания. В случае если концентрация газа  $C_{\Gamma}$  в облаке неизвестна, она принимается равной НКПВ (нижнему концентрационному пределу воспламенения) горючего газа. Расчет при этом надо проводить в условии  $C_{\Gamma} \leq C_{\text{ст}}$ . Кроме того, для газов тяжелее воздуха энергозапас  $E$  удваивается (т. е. для нашего случая).

Далее определяется класс горючего вещества по степени чувствительности к инициированию взрывных процессов по соответствующей таблице и тип окружающего пространства по загроможденности. Последнее сильно (через турбулизацию потока) влияет на протекание взрыва и усиливает ударную волну. Для рассматриваемых сценариев аварий целесообразно взять слабо загроможденное пространство (вид 4 по соответствующей таблице). Далее, по специальной таблице, по режиму взрывного горения вещества определяется диапазон скоростей распространения фронта пламени [5]. При этом если получается сверхзвуковое горение (детонация), то данный случай по сравнению с дефлаграцией гораздо опаснее [7].

Для вычисления параметров воздушной ударной волны на заданном расстоянии  $R$  от центра облака рассчитывается соответствующее безразмерное расстояние  $R_x$  (через энергозапас  $E$  и атмосферное давление  $P_0$ ), безразмерное давление  $P_x$  и безразмерный импульс фазы сжатия  $I_x$ . При этом  $R_x = R/(E/P_0)^{1/3}$ .

После определения безразмерных величин давления и импульса фазы сжатия вычисляются соответствующие им размерные величины по формулам:

$$\Delta P = P_x \cdot P_0, \quad (2)$$

$$I = I_x \cdot (P_0)^{2/3} E^{1/3} / C_0. \quad (3)$$

Вероятность повреждений стен промышленных зданий (через пробит-функцию  $Pr_1$ ), при которых возможно восстановление зданий без их сноса, с учетом фактора  $V_1$  может оцениваться по соотношениям:

$$V_1 = \left( \frac{17500}{\Delta P} \right)^{8,4} + \left( \frac{290}{I} \right)^{9,3}; \quad (4)$$

$$Pr_1 = 5 - 0,26 \ln V_1. \quad (5)$$

Вероятность разрушений промышленных зданий, при которых здания подлежат сносу, оценивается по соотношениям с учетом фактора  $V_2$ :

$$V_2 = \left( \frac{40000}{\Delta P} \right)^{7,4} + \left( \frac{460}{I} \right)^{11,3}; \quad (6)$$

$$Pr_2 = 5 - 0,22 \ln V_2. \quad (7)$$

Получив значения пробит-функции, по табл. 1 можно определить уже само значение вероятности.

Поражающее действие ударной волны на людей помимо [5] можно оценить согласно [2]. Но следует отметить, что в последнем источнике избыточное давление волны для слабого поражения (10 кПа), согласно современным представлениям, несколько завышено.

Благодаря автоматизации расчетов можно достаточно быстро, путем «выхода» на определенное значение пробит-функции, оценить опасные зоны как для зданий, так и для людей (вручную производить такие расчеты трудоемко). Для этих целей достаточно ввести необходимый формульный аппарат (он достаточно громоздкий и в работе не приведен полностью), например, в электронные таблицы. Нахождение зон фактически сводится к изменению расстояния  $R$  от центра взрыва до рассматриваемых точек и нахождению требуемого значения пробит-функции и затем вероятности (см. табл. 1).

Таблица 1

**Связь пробит-функции  $P$  (числа в клетках таблицы) и вероятности, выраженной в процентах**

| $P, \%$ | 0    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0       |      | 2,67 | 2,95 | 3,12 | 3,25 | 3,38 | 3,45 | 3,52 | 3,59 | 3,66 |
| 10      | 3,72 | 3,77 | 3,82 | 3,86 | 3,92 | 3,96 | 4,01 | 4,05 | 4,08 | 4,12 |
| 20      | 4,16 | 4,19 | 4,23 | 4,26 | 4,29 | 4,33 | 4,36 | 4,39 | 4,42 | 4,45 |
| 30      | 4,48 | 4,5  | 4,53 | 4,56 | 4,59 | 4,61 | 4,64 | 4,67 | 4,69 | 4,72 |
| 40      | 4,75 | 4,77 | 4,8  | 4,82 | 4,85 | 4,87 | 4,9  | 4,92 | 4,95 | 4,97 |
| 50      | 5    | 5,03 | 5,05 | 5,08 | 5,1  | 5,13 | 5,15 | 5,18 | 5,2  | 5,23 |
| 60      | 5,25 | 5,28 | 5,31 | 5,33 | 5,36 | 5,39 | 5,41 | 5,44 | 5,47 | 5,5  |
| 70      | 5,52 | 5,55 | 5,58 | 5,61 | 5,64 | 5,67 | 5,71 | 5,74 | 5,77 | 5,81 |
| 80      | 5,84 | 5,88 | 5,92 | 5,95 | 5,99 | 6,04 | 6,08 | 6,13 | 6,18 | 6,23 |
| 90      | 6,28 | 6,34 | 6,41 | 6,48 | 6,55 | 6,64 | 6,75 | 6,88 | 7,05 | 7,33 |
| 99      | 7,33 | 7,37 | 7,41 | 7,46 | 7,51 | 7,58 | 7,65 | 7,75 | 7,88 | 8,09 |

Приведем расчет взрыва емкости объемом  $V = 5,07 \text{ м}^3$  сжиженного газа на расстоянии 100 м. Емкость в виду того, что сжиженный газ имеет высокий коэффициент объемного расширения, заполнится не полностью [6]. Учтем этот факт, введя коэффициент к объему 0,85.

Масса газа  $M_r = 0,85 \cdot V \cdot \rho$ , где  $\rho$  — плотность сжиженного газа. Согласно [6], плотность пропана при  $0^\circ\text{C}$  составляет  $510 \text{ кг/м}^3$ , а бутана (как средняя между н-бутаном и изо-бутаном) — примерно  $590 \text{ кг/м}^3$ . Учитывая, что пропана в топливе 75 %, а бутана 25 %, как указывалось выше, можно с достаточной точностью оценить среднюю плотность в  $535\text{--}540 \text{ кг/м}^3$ . Получаем, что  $M_r = 0,85 \cdot 5,07 \cdot 540 = 2327 \text{ кг}$ . При расчете удельной теплоты сгорания  $q_r$  учтем, что коэффициент  $\beta$  для пропана и бутана практически не различается (1,05 и 1,04 соответственно). Поэтому, так как пропана значительно больше, можно принять  $\beta = 1,05$ . В итоге величина  $q_r = 44 \cdot 1,05 \cdot 10^6 = 46200000 \text{ Дж/кг}$ . Отсюда энергозапас  $E = 2 \cdot M_r \cdot q_r = 2327 \cdot 46200000 = 2,15 \cdot 10^{11} \text{ Дж}$ .

Далее по таблицам методики [5] находим ожидаемый диапазон скорости взрывного превращения — 4. Для него характерна дефлаграция, т. е. дозвуковое горение. При этом скорость фронта пламени составляет  $150\text{--}200 \text{ м/с}$ .

Определяем безразмерное расстояние  $R_x$ :

$$R_x = \frac{R}{\left(\frac{E}{P_0}\right)^{\frac{1}{3}}} = \frac{100}{\left(\frac{2,15 \cdot 10^{11}}{101325}\right)^{\frac{1}{3}}} = 0,78.$$

Опуская промежуточные вычисления в итоге получаем:

$$\Delta P = P_x \cdot P_0 = 0,39 \cdot 101325 = 39001 \text{ Па};$$

$$I = \frac{I_x \cdot (P_0)^{\frac{2}{3}} \cdot E^{\frac{1}{3}}}{C_0} = \frac{0,039 \cdot 101325^{\frac{2}{3}} \cdot (2,03 \cdot 10^{11})^{\frac{1}{3}}}{340} = 1525 \text{ Па}\cdot\text{с}.$$

Пробит-функция повреждений стен промышленных зданий, при которых возможно восстановление зданий без их сноса, с учетом фактора  $V_1$ :

$$V_1 = \left(\frac{17500}{\Delta P}\right)^{8,4} + \left(\frac{290}{I}\right)^{9,3} = \left(\frac{17500}{39001}\right)^{8,4} + \left(\frac{290}{1525}\right)^{9,3} = 0,00119;$$

$$Pr_1 = 5 - 0,26 \cdot \ln V_1 = 5 - 0,26 \cdot \ln 0,0005 = 6,75.$$

Согласно табл. 1 определяем, что вероятность восстановления стен промышленных зданий после повреждения без сноса самого здания составляет 96 %.

Пробит-функция повреждения промышленных зданий, при которых здания подлежат сносу, оценивается по соотношению  $Pr_2$  с учетом фактора  $V_2$ :

$$V_2 = \left(\frac{40000}{\Delta P}\right)^{7,4} + \left(\frac{460}{I}\right)^{11,3} = \left(\frac{40000}{39001}\right)^{7,4} + \left(\frac{460}{1525}\right)^{11,3} = 1,20574;$$

$$Pr_2 = 5 - 0,22 \cdot \ln V_2 = 5 - 0,22 \cdot \ln 1,20574 = 4,96.$$

В итоге вероятность разрушений — 49 %. Как видно, для данного расстояния, судя по результатам, значительно преобладает сценарий повреждения, при котором здания могут быть восстановлены.

В ходе проведения моделирования поражающих факторов согласно [5] были замечены некоторые ее недочеты. Первое — отсутствие асимптотического приближения давления к нулю при увеличении расстояния и соответствующие отклонения пробит-функции. Данный факт

объясняется неправильными знаками в формулах избыточного давления и импульса. В работе [3] также замечен данный факт и автором написано соответствующее письмо в Ростехнадзор.

Во-вторых, нами было замечено, что пробит-функция  $Pr_1$  (вероятность восстановления стен без сноса самого здания) при приближении к центру взрыва не убывает, а, наоборот, возрастает. Это не логично, так как здания при этом должны получать большие повреждения. Для исправления данного недочета предлагаем сменить знак в формуле  $Pr_1 = 5 - 0,26 \cdot \ln V_1$  с минуса на плюс. В результате мы приходим к более логичным результатам.

Проведем дальнейшие расчеты с учетом сделанных предложений. Для емкости  $5,07 \text{ м}^3$  определим вероятности сценариев повреждения стен с последующим сносом здания (через  $Pr_2$ ) и восстановления без сноса (через  $Pr_1$ ) в зависимости от расстояния до центра взрыва  $R$ . Для табулированных значений  $R$  результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Пробит-функции и вероятности повреждения зданий в зависимости от расстояния до центра взрыва для емкости  $5,07 \text{ м}^3$**

| $R$ , м | $Pr_1$ | Вероятность восстановления без сноса, % | $Pr_2$ | Вероятность сноса, % |
|---------|--------|---|--------|----------------------|
| 50      | 1,378  | 0                                       | 6,35   | 91                   |
| 100     | 3,25   | 4                                       | 4,96   | 49                   |
| 150     | 4,27   | 23                                      | 4,2    | 21                   |
| 200     | 5,11   | 54                                      | 3,57   | 8                    |
| 250     | 5,78   | 78                                      | 3,07   | 3                    |
| 300     | 6,29   | 90                                      | 2,69   | 1                    |
| 350     | 6,68   | 95                                      | 2,4    | 0                    |
| 400     | 7      | 98                                      | 2,16   | 0                    |
| 450     | 7,27   | 98,5                                    | 1,96   | 0                    |
| 500     | 7,49   | 99,3                                    | 1,79   | 0                    |

Из таблицы видно, что с учетом предложенных исправлений вероятность восстановления без сноса, как положено, стремится к нулю при уменьшении расстояния. При  $R$  менее 100 м данная вероятность уже очень мала. На расстоянии более 300 м вероятность восстановления составляет 90 % и больше. Таким образом, можно получить оценки относительно безопасных радиусов вокруг взрыва для зданий с точки зрения пробит-функции  $Pr_1$ . Можно также рассуждать с точки зрения пробит-функции  $Pr_2$  о вероятности сноса. В данном случае, при расстоянии менее 100 м, вероятность сноса будет больше 50 %. На расстоянии в 50 м вероятность сноса составляет уже 91 %.

Следует отметить, что более точный характер повреждения зданий и сооружений возможно определить через две характеристики. Первая — это величина  $\Delta P$  избыточного давления на данном расстоянии. Вторая — конкретный тип здания или сооружения (кирпичное, из легкого железобетона, из металлического каркаса и т. д.). Далее оценку повреждений можно сделать, например, по [2] или по данным технической документации на строение.

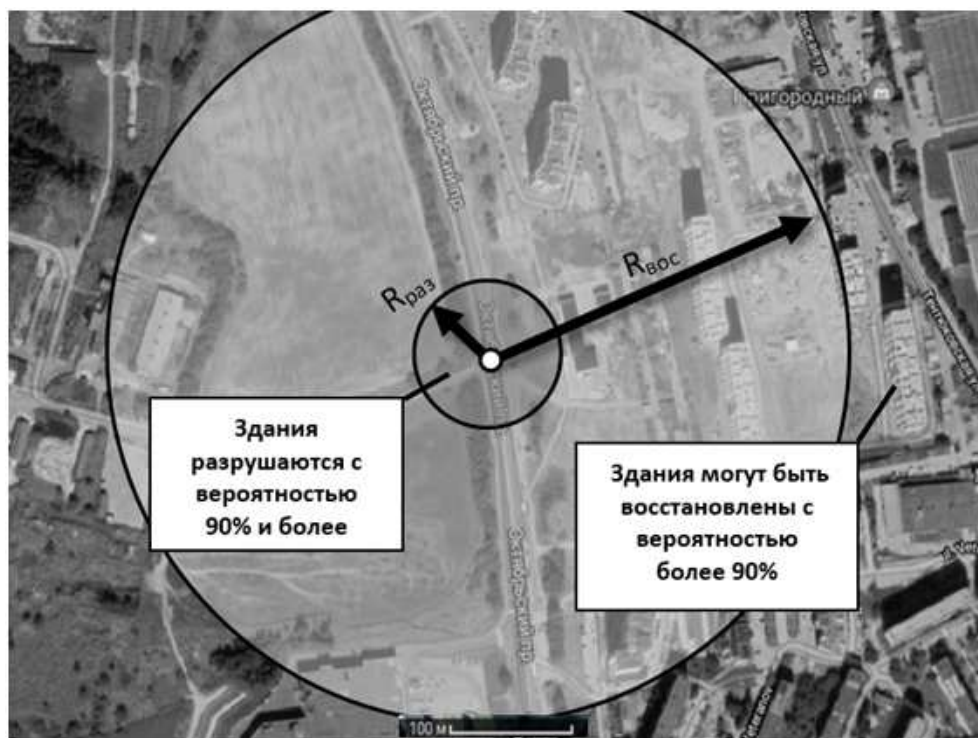


Рис. 1. Зоны воздействия ударной волны на здания при взрыве емкости 5.07 м<sup>3</sup>

Напрямую радиус безопасных зон для промышленных зданий по данной методике установить затруднительно. Однако вполне можно определить внутренний радиус зоны восстановления и внешний радиус зоны сноса зданий. Формульный аппарат методики достаточно большой, поэтому целесообразно проводить моделирование в электронных таблицах (например, Excel) или пакетах типа Mathcad. В случае программы Excel удобно применить известную встроенную функцию обратных расчетов — анализ «что если».

Выберем условно в качестве высокой вероятности реализации сценария величину 90 % и найдем, как выше указывалось, радиусы опасных зон для емкости 5,07 м<sup>3</sup>. Расчеты приходят к следующим результатам. Внутренний радиус зоны, в которой возможно восстановление зданий, составит  $R_{\text{вос}} = 300$  м. Внешний радиус зоны разрушения  $R_{\text{раз}} = 52$  м (см. рис. 1). Избыточное давление  $\Delta P$  в ударной волне соответственно составит 9,72 кПа и 87,3 кПа.

Аналогичные расчеты параметров зон можно провести для других емкостей — 10, 20, 31, 45, 50 м<sup>3</sup>. Результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

### Радиусы зон повреждения промышленных зданий для различных емкостей автоцистерн с сжиженным газом

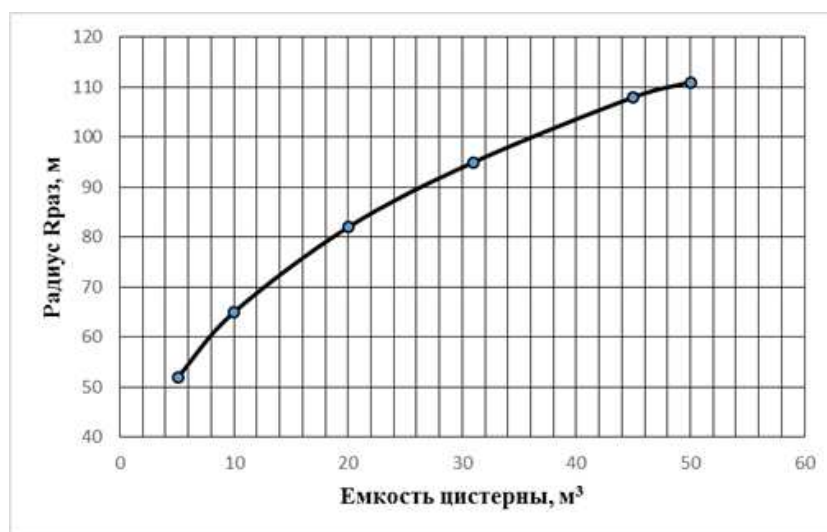
| Емкость автоцистерны, м <sup>3</sup> | $R_{\text{раз}}$ , м<br>( $\Delta P$ , кПа) | $R_{\text{вос}}$ , м<br>( $\Delta P$ , кПа) |
|--------------------------------------|---|---|
| 5,07                                 | 52 (87,3)                                   | 300 (9,7)                                   |
| 10                                   | 65 (87,8)                                   | 376 (9,7)                                   |
| 20                                   | 82 (87,8)                                   | 473 (9,7)                                   |
| 31                                   | 95 (87,4)                                   | 549 (9,7)                                   |
| 45                                   | 108 (86,9)                                  | 620 (9,7)                                   |
| 50                                   | 111 (87,8)                                  | 642 (9,7)                                   |

Из табл. 3 следует, что радиусы зон восстановления примерно в 5,8 раз больше, чем для зон разрушения. Также видно, что вероятности 90 % для зоны разрушения соответствуют избыточному давлению  $\Delta P$



ударной волны, примерно равному 87–88 кПа, а зоны восстановления — 9,7 кПа. Данные цифры можно сравнить с устоявшимися в научной литературе данными. Известно, что полное разрушение промышленных зданий обычно наблюдается в пределах 50–80 кПа, а слабые разрушения для тех же зданий начинаются с 10–20 кПа [2].

Из табл. 3 также следует, что зависимость радиусов зон сильно нелинейная. Так увеличение объема емкости примерно в 4 раза (с 5,07 до 20 м<sup>3</sup>) приводит к увеличению радиусов зон всего на 25 %.



**Рис. 2.** Радиус зоны разрушения в зависимости от объема перевозимого сжиженного газа

Графики зависимости радиусов зон разрушения промышленных зданий и их возможного восстановления от объема емкостей с сжиженным газом приведены на рис. 2 и 3.

В результате проделанной работы можно сделать следующие выводы:

1. Методика [5] позволяет провести моделирование результатов аварийных взрывов автомобильных цистерн с сжиженным газом.
2. Для оценки опасных зон для промышленных зданий предлагается рассчитывать радиусы зон, в которых возможно восстановление без сноса построек, и радиусы зон, в которых последует снос зданий.
3. Представлены поправки, учет которых дает логически правильные результаты как для избыточного давления, так и для пробит-функции.

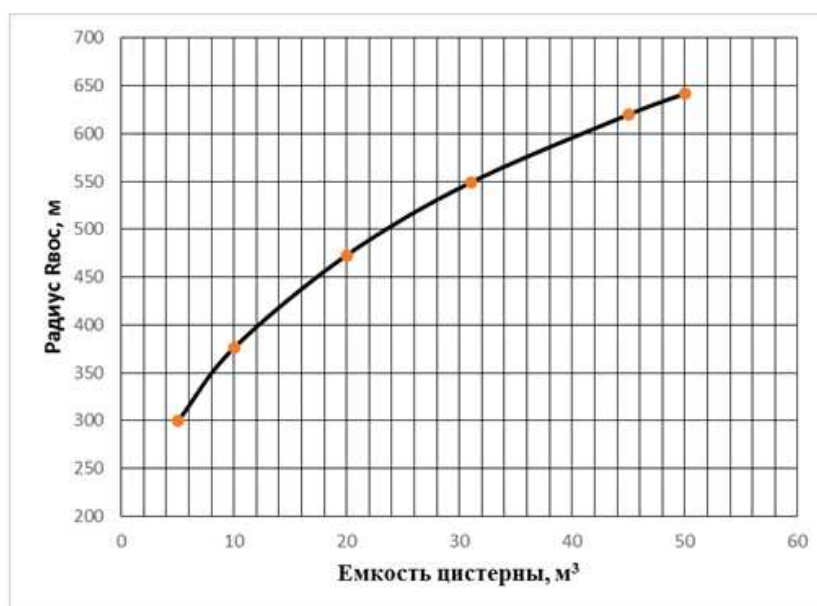


Рис. 3. Радиус зоны восстановления в зависимости от объема перевозимого сжиженного газа

4. Приведенные графики радиусов зон позволяют провести экспресс-оценку размеров опасных зон вокруг возможного места аварии.

## Список литературы

1. Газовозы. Автоцистерны СУГ. URL: <https://rodisgroup.ru> (дата обращения 01.12.2018).
2. Защита объектов народного хозяйства от оружия массового поражения : справочник/ Г. П. Демиденко. 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Выща шк., 1989. 287 с.
3. **Ивкина М. А.** Анализ «Методики оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей» // *Безопасность в чрезвычайных ситуациях : сборник научных трудов VIII Всероссийской научно-практической конференции.* СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. С. 380–382.
4. **Рачевский Б. С.** Сжиженные углеводородные газы. М.: Нефть и газ, 2009. 164 с.

5. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей : руководство по безопасности. Сер. 27. М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследования проблем промышленной безопасности», 2015. Вып. 15. 44 с.
6. **Стаскевич Н. Л., Северинец Г. Н., Вигдорчик Д. Я.** Справочник по газоснабжению и использованию газа. Л.: Недра, 1990. 762 с.
7. **Храмов Г. Н.** Горение и взрыв. СПб: Изд-во СПбГТУ, 2007. 278 с.

### Summary

**Golovataya O. S., Petrakov A. P., Shilov S. V.** The calculation of hazardous areas explosion of tanks with liquefied gas

In the work the simulation of the damaging effect of shock wave in the explosion of liquefied gas was carried out. Amendments to the normative method of calculation are made. Cases of transportation of gases in automobile tanks and their stationary placement are considered. The method of estimation of hazardous zones of industrial buildings is given.

*Keywords: shock wave, defeat, liquefied gas.*

### References

1. *Gazovozy. Avtotsisterny SUG* (Gas carrier. Tankers), Liquefied petroleum gas. URL: <https://rodisgroup.ru> (date of the application: 28.11.2018).
2. *Zashchita ob'yektov narodnogo khozyaystva ot oruzhiya massovogo porazheniya* (Protection of objects of national economy from weapons of mass destruction), a Handbook, G. P. Demidenko, 2nd ed. Kiev, HighSchoolPubl., 1989, 287 p.
3. **Ivkina M. A.** Analiz «Metodiki otsenki posledstviy avariynykh vzryvov toplivno-vozdushnykh smesey» («Methods of estimation of consequences of emergency fuel-air mixtures explosions»), *Safety in emergency situations. Proc. of the VIII all-Russian scientific-practical conference*, Saint-Petersburg, Polytechnical University Publ., 2017, pp. 380–382.
4. **Rachevsky B. S.** *Szhizhennyye uglevodorodnyye gazy* (Liquefied petroleum gases), Moscow, Oil and gas Publ, 2009, 164p.

5. *Rukovodstvo po bezopasnosti «Metodika otsenki posledstviy avariynykh vzryvov toplivno-vozdushnykh smesey»* (Safety Guide «Methods for assessing the effects of emergency explosions of fuel-air mixtures»), series 27, issue 15, Moscow, Closed Joint Stock Company «Scientific and Technical Center for the Study of Industrial Safety Problems», 2015, 44 p.
6. **Staskevich N. L., Sevyarynets G. N., Vigdorichik D. Ya.** *Spravochnik po gazosnabzheniyu i ispol'zovaniyu gaza* (Handbook of gas supply and use of gas), Leningrad, NedraPubl, 1990, 762 p.
7. **Hramov G. N.** *Goreniye i vzryv* (Burning and explosion), Saint-Petersburg, St. Petersburg State Technical UniversityPubl, 2007, 278 p.

**Для цитирования:** Головатая О. С., Петраков А. П., Шилов С. В. Расчет опасных зон взрыва емкостей с сжиженным газом // *Вестник Сыктывкарского университета. Сер. 1: Математика. Механика. Информатика. 2018. Вып. 4 (29). С. 12–23.*

**For citation:** Golovataya O. S., Petrakov A. P., Shilov S. V. The calculation of hazardous areas explosion of tanks with liquefied gas, *Bulletin of Syktyvkar University. Series 1: Mathematics. Mechanics. Informatics*, 2018, 4 (29), pp. 12–23.