

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗРЫВОВ ГАЗОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ С УЧЕТОМ СНОСА ОБЛАКА ВЕТРОМ

*С. В. Шилов*

В работе проведено моделирование поражающего действия ударной волны при взрыве сжиженной пропан-бутановой смеси. Расчеты проводились по двум методикам. По первой рассчитывались зоны разрушения зданий и поражения людей. По второй были определены величины сноса облака газозвдушной смеси ветром. С учетом этого возможные опасные зоны оказались значительно шире. Так, зоны разрушения зданий и поражения людей из-за распространения облака вдоль поверхности земли увеличиваются примерно в пять-шесть раз. Эти факты надо обязательно учитывать при расположении объектов, использующих сжиженные газы, а также при транспортировке таких газов. При определении опасных зон использована вероятностная модель. В качестве зон возможного разрушения зданий условно приняты такие расстояния, на которых вероятность разрушений составляет 90 %. Аналогично для людей в опасных зонах вероятность повреждения барабанных перепонок составила 90 % и выше.

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

### 1. Введение

Сжиженные углеводородные газы благодаря экологичности и более низкой цене (по сравнению с бензином) нашли широкое применение в автомобильном транспорте и бытовых газовых электроприборах [1]. В автомобилях потребление пропан-бутановых смесей непрерывно растет. Большие объемы сжиженного под давлением газа перевозятся газозами (до 50 м<sup>3</sup>) [2]. Еще большие транспортные объемы можно встретить на железной дороге.

Газы при утечке смешиваются с воздухом и образуют взрывоопасную смесь. Это несет потенциально большую опасность как для людей, так и объектов городской инфраструктуры [3]. Причем сжиженные пропан, а также бутан при взрыве могут создавать несколько поражающих факторов, создавая риски существенно большие, чем для других низкокипящих жидкостей [4]. Необходимость расчета поражающих факторов взрыва газов поднималась в зарубежных изданиях за последние пять лет, и предлагались различные модели их расчета [5].

Для превентивного определения опасных зон при взрыве и принятия мер по снижению возможного поражения необходимо проводить моделирование последствий аварии. Эта задача решалась в данной работе. Описана методика расчета ударной волны взрыва без учета и с учетом сноса облака газоздушной смеси ветром, определены опасные зоны для зданий и людей. Также рассмотрена программа расчета взрыва, используемая в МЧС (Министерство по чрезвычайным ситуациям) по Республике Коми. Показано, что она дает корректные результаты только при небольших объемах взрывающего газа и не учитывает дальность сноса облака ветром.

## 2. Методики расчета

Для нахождения опасных зон при взрыве газоздушных смесей используются специальные методики [6; 7]. На их основе возможно рассчитать значения ударной волны взрыва, вероятности поражения людей и разрушения зданий. Поскольку газ используется в качестве топлива, то его смесь с воздухом считаем топливно-воздушной.

Рассмотрим основные формулы и положения методики [6]. Более подробно ее формульный аппарат изложен в статье [8].

Расчет основных параметров взрыва топливно-воздушной смеси (ТВС) начинают с определения эффективного энергозапаса:

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

где  $M_{\Gamma}$  — масса горючего вещества, содержащегося в облаке ТВС, кг (определяется исходя из условий развития аварии),  $q_{\Gamma}$  — теплота сгорания,  $C_{\text{ст}}$  и  $C_{\Gamma}$  — стехиометрическая и реальная концентрация газа в воздухе.

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

$C_T \leq C_{ст}$ . Кроме того, для газов тяжелее воздуха (т. е. для пропан-бутановой смеси) энергозапас  $E$  удваивается.

В качестве исходных данных рассмотрим, что используется пропан-бутановая смесь в летнем варианте (75 % пропана и 25 % бутана) и происходит ее разгерметизация при аварии с емкостью, где смесь находится в сжиженном виде под давлением.

Исходя из полученного энергозапаса, чувствительности газа к взрывному сгоранию и вида окружающей территории (например, открытая или сильно загроможденная) можно просчитать скорость взрывного превращения и ударную волну [6; 8]. Но основной недостаток методики [6] — игнорирование влияния ветра (движения воздуха) при различных состояниях атмосферы. При этом сноса облака не происходит и возможные зоны поражения получаются гораздо меньшего радиуса. Более приближенную к реальности ситуацию можно смоделировать в случае учета состояния атмосферы согласно [7]. Тем более известно, что в ряде случаев опасные концентрации при разгерметизации емкостей с сжиженными газами наблюдали на большом расстоянии от места аварии в подвальных помещениях и других заглубленных местах. И это как раз пример сноса газовоздушного облака. Согласно [7], аварийный взрыв газа в смеси с воздухом рассматривается как наземный, считается, что облако имеет форму полусферы. Его объем в  $m^3$ , находится по формуле

$$V_{TBC} = (2240\chi M_T T) / (\mu C_{ст} T_0), \quad (2)$$

где  $M_T$  — масса горючего вещества, содержащегося в облаке, кг;  $\chi$  — доля массы исходного топлива, переходящего в облако, значения  $\chi$  за-табулированы, см. например [3];  $T$  — температура окружающей среды, °К;  $\mu$  — молекулярная масса горючего газа (для пропана  $\mu = 44$ , бутана  $\mu = 58$ );  $T_0 = 273$  °К.

Радиус облака в метрах находится по формуле исходя из объема полусферы:

$$r_0 = 0,78 \sqrt[3]{V_{TBC}}. \quad (3)$$

Под действием ветра облако газа переносится от центра его образования на расстояние  $\Delta L$ , м. Величина  $\Delta L$  рассчитывается по формуле [7]:

$$\Delta L = (0,44r_0/\alpha)^{1/k}, \quad (4)$$

где значения коэффициентов  $\alpha$  и  $k$  можно определить из табл. 1. В работе [7] описаны особенности классов устойчивости атмосферы.

Таблица 1

**Значения коэффициентов  $\alpha$  и  $k$**

Класс устойчивости атмосферы по Пасквиллу	$\alpha$	$k$
A	0,43	0,89
B	0,26	0,92
C	0,20	0,92
D	0,13	0,92
E	0,08	0,94
F	0,05	0,94

Облако может быть смещено в любую сторону от места аварии, поэтому радиус опасной зоны будет, соответственно, больше на величину смещения  $\Delta L$ .

**3. Расчет взрыва газоздушной смеси и учет сноса облака ветром**

Приведем пример расчета опасных зон для типичной автомобильной емкости объемом  $V=5,07 \text{ м}^3$ . Согласно работе [1], средняя плотность смеси из 25 % бутана и 75 % пропана при 0 °С составляет  $540 \text{ кг/м}^3$ . Тогда масса газа вычисляется так:

$$M_{\Gamma} = 0,85V\rho = 0,85 \cdot 5,07 \cdot 540 = 2327,13 \text{ (кг)}.$$

Теперь определяем теплоту сгорания  $q_{\Gamma}$  и эффективный энергозапас образующегося облака следующим образом:

$$q_{\Gamma} = 44\beta = 44 \cdot 1,05 \cdot 10^6 = 46,2 \cdot 10^6 \text{ (Дж/кг)},$$

$$E = 2M_{\Gamma}q_{\Gamma} = 2 \cdot 2327,13 \cdot 46,2 \cdot 10^6 = 2,15 \cdot 10^{11} \text{ (Дж)}.$$

Далее по таблице 1 методики [6] определяем степень чувствительности (класс) газа к взрыву. Таких классов в таблице четыре. К первому классу (это особо чувствительные газы) относятся, например, ацетилен, водород. Они способны взрываться в режиме детонации (быстро,

со скоростью сгорания больше скорости звука) даже в малом объеме ячейки размером 2 см и менее. К четвертому классу относятся слабочувствительные (гораздо менее опасные) к взрыву вещества с размером детонационной ячейки 40 см и более. Это, например, метан, керосин, бензол и др. Рассматриваемые в нашем примере газы — пропан, а также бутан — относятся ко 2-му классу (так называемые чувствительные вещества).

Затем следует задать тип загроможденности окружающего пространства. Это важный фактор, определяющий параметры взрыва. Дело в том, что при увеличении количества препятствий на пути движущегося фронта горения смеси растет степень его завихрения (турбулентности). Это, как известно, приводит к возрастанию возникающего избыточного давления и большему поражающему действию [3]. С этой точки зрения более безопасно открытое пространство. Наоборот, большее давление взрыва следует ожидать при увеличении загроможденности (в последнем случае скорость детонационного горения достигает 500 м/с и более). В нашем случае с учетом транспортировки газа автомобильными газовозами по дороге логично взять вид 4 из табл. 2. Этот вид соответствует слабозагроможденному или открытому пространству.

На основании выбранного класса чувствительности и вида окружающего пространства определяется скорость взрывного превращения. Она, согласно руководству [6], составляет 150–200 м/с (тип горения — дефлаграция, т. е. дозвуковое горение).

Затем находим такие расстояния, при которых величины избыточного давления  $\Delta P$  и импульса  $I$  ударной волны соответствуют 90 % вероятности повреждения зданий или поражения людей [6].

В табл. 2 приведены радиусы  $R_{\text{раз}}$  зон разрушений зданий для нескольких объемов емкостей, внутри которых вероятность разрушений 90 % и более (90 % соответствует границе зоны). Также представлены радиусы  $R_{\text{вос}}$  зон восстановления зданий и зоны возможного разрыва барабанных перепонок людей. Это относительно безопасные расстояния, при которых здания не получают разрушения с вероятностью 90 % и более [8]. Также в таблице представлены радиусы безопасных зон и зон с 50 % повреждением барабанных перепонок.

Данную таблицу можно использовать для сравнения с аналогичными, рассчитанными ниже, но уже с учетом сноса облака ветром.

Таблица 2

**Радиусы зон повреждения промышленных зданий и радиусы поражения людей для емкостей автоцистерн 5,07, 10 и 31 м<sup>3</sup> без учета сноса облака ТВС ветром**

Емкость ав- тоцистерны, м <sup>3</sup>	R <sub>разр</sub> , м (ΔP, кПа)	R <sub>вос</sub> , м (ΔP, кПа)	Вероятность разрыва перепонок и радиусы таких зон, м	
			0 %	50 %
5,07	52 (87,3)	300 (9,7)	160	45
10	65 (87,8)	376 (9,7)	203	57
31	95 (87,4)	549 (9,7)	295	84

Вычисления поражений людей для емкости 5,07 м<sup>3</sup> дают следующие результаты. Вероятность разрыва барабанных перепонок составляет 50 % на расстоянии 45 м. Условно безопасное расстояние, при котором вероятность разрыва перепонок 0 % наблюдается на 160 м. Для двух других емкостей результаты приведены в табл. 2.

Снос облака ветром (при аварии с разливом сжиженного газа) существенно расширяет опасные зоны.

Приведем расчет для емкости 5,07 м<sup>3</sup> согласно руководству [7]. Также выясним особенности данного процесса при разном состоянии атмосферы и влияние температуры окружающей среды. В качестве сравнения выберем две разные по знаку температуры (+15°C и -15°C).

Найдем объем облака при температуре +15°C по формуле (2):

$$V_{TBC} = (2240\chi M_T T) / (\mu C_{ст} T_0) = (2240 \cdot 0,5 \cdot 2327,13 \cdot 288) / (44 \cdot 4,03 \cdot 273) = 15506,39 \text{ м}^3.$$

В качестве молекулярной массы бралась величина  $\mu = 44$  для пропана, поскольку в смеси его преобладающее количество и это соответствует большему размеру облака, т. е. более неблагоприятному сценарию.

Найдем радиус облака:

$$r_0 = 0,78 \cdot \sqrt[3]{V_{TBC}} = 0,78 \cdot \sqrt[3]{15506,39} = 19,45 \text{ м}.$$

Под действием ветра облако переносится от центра его образования на расстояние  $\Delta L$ . Найдем дальность сноса облака по классу устойчивости атмосферы  $A$ :

$$\Delta L = (0,44 \cdot r_0/\alpha)1/k = (0,44 \cdot 19,45/0,43)1/0,89 = 28,8 \text{ м.}$$

Аналогично найдем  $\Delta L$  при разрыве автоцистерны емкостью  $5,07 \text{ м}^3$  для остальных классов устойчивости атмосферы и для разных температур окружающей среды. Полученные данные представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Дальность сноса облака в зависимости от класса устойчивости атмосферы и температуры для емкости  $5,07 \text{ м}^3$**

Класс устойчивости атмосферы	Дальность сноса облака $\Delta L$ , м	
	$T=+15^\circ\text{C}$	$T=-15^\circ\text{C}$
A	28,8	–
B	44,6	–
C	59,32	57,0
D	94,75	91,01
E	114,15	109,64
F	237,67	228,58

Как видно из табл. 3, при положительной температуре наблюдается несколько большее значение дальности сноса. Однако, в целом, влияние температуры не такое значительное. Первые два значения при отрицательной температуре на рассчитывались, поскольку они относятся к типично летним условиям.

Влияние класса устойчивости, согласно табл. 3, велико. Поэтому с точки зрения расчета максимально неблагоприятного сценария целесообразно моделировать случай  $F$  при положительной температуре, что и было сделано в работе.

Таким образом, рассчитанные выше опасные зоны для зданий и людей (при  $V = 5,07 \text{ м}^3$ ) следует увеличить на  $\Delta L \approx 238 \text{ м}$ .

Аналогично были проведены расчеты для других объемов емкостей, используемых в перевозке и хранении пропан-бутановых смесей. Приведем табл. 4 (см. ниже) с уточненными данными опасных зон с учетом сноса облака ветром. Брался неблагоприятный сценарий с устойчивостью атмосферы по типу *F* с температурой +150°С. Для емкостей 10 и 31 м<sup>3</sup> рассчитанные величины  $\Delta L$  составили 302 и 452 м соответственно. Таким образом при росте объема примерно в 6 раз (с 5,07 до 31 м<sup>3</sup>) дальность сноса увеличивается примерно в 2 раза, т. е. зависимость сильно нелинейная.

Таблица 4

**Максимальные опасные зоны с учетом сноса облака ветром**

Емкость автоцистерны, м <sup>3</sup>	R <sub>разр</sub> , м (ΔP, кПа)	R <sub>вос</sub> , м (ΔP, кПа)	Вероятность разрыва перепонок и радиусы таких зон, м	
			0 %	50 %
5,07	290 (87,3)	538 (9,7)	398	283
10	367 (87,8)	678 (9,7)	502	359
31	547 (87,4)	1001 (9,7)	742	535

Оценки показывают, что для зданий радиусы R<sub>раз</sub> зон разрушения при учете сноса облака увеличиваются примерно в 5–6 раз. Зоны восстановления показывают меньший рост — примерно в 2 раза. Последнее связано с относительно большим их значением. Аналогичная ситуация наблюдается и для зон с повреждением барабанных перепонок.

Полученные результаты необходимо учитывать при хранении и транспортировке больших количеств сжиженной пропан-бутановой смеси. Также с учетом возможного сноса  $\Delta L$  следует располагать жилые, производственные здания и сооружения вблизи опасных объектов сжиженного газа.

**4. Сравнение результатов расчетов с программой «Инженерные расчеты»**

Прогноз последствий взрыва и оперативной обстановки по поражениям людей и разрушению зданий — одна из главных задач, решаемых



на опасных объектах, а также в МЧС. Для этих целей в МЧС существуют специализированные программы.

В учебных целях используется разработанная в 2001 году программа «Инженерные расчеты», предложенная МЧС по Республике Коми. Она написана достаточно давно и последние изменения сделаны 9 лет назад. В описании программы не приведен формульный аппарат и нет ссылки на нормативные документы. В связи с тем что правильные, наиболее точные прогностические расчеты последствий взрыва ТВС дает именно утвержденная нормативная методика [6], представляется важным проверить работу данной программы. Неверные оценки избыточного давления взрыва могут повлечь занижение размеров опасных зон, человеческие жертвы и повреждения объектов инфраструктуры.

С целью достоверности результатов программы был использован следующий метод. Рассчитывались избыточные давления взрыва для емкостей от 5,07 до 50 м<sup>3</sup> в программе и по методике для последующего сравнения. В программу подставляли соответствующую массу газа. При этом расстояние было фиксированным — 100 м. Снос облака в данном случае не учитывался, так как в программе отсутствует такой пункт меню (см. рис. 1). Результаты определения ударной волны и процента отклонения приведены в табл. 5.

Таблица 5

**Сравнение величин ударных волн, рассчитанных по программе МЧС и по методике [6]**

Емкость, м <sup>3</sup>	$\Delta$ Руд. волны по программе, кПа	$\Delta$ Руд. волны по методике [6]	Отклонение %
5,07	39,74	39	1,9
10	49,92	51	2,1
15	64,95	60	8,3
20	74,56	68	9,7
31	96,73	82	17,9
45	130,22	96	35,6
50	139,53	101	38,1

Как видно из табл. 5, значительное возрастание процента отклоне-

Взрыв газоздушных смесей

Количество вещества, кг: 6885

Способ хранения: Сжиженные под давлением

Вид вещества: Пропан

Расстояние от центра взрыва, м: 100

Результат    Печать результатов

*Радиус зоны действия детонационной волны, м*: 28,56

*Давление ударной волны, кПа (для перевода в кгс/кв.см разделите результат на 100)*: 64,95

Расстояние от центра взрыва с давлением 100 кПа (1 кг/кв.см), м

50 кПа (0,5 кг/кв.см)	114,24
30 кПа (0,3 кг/кв.см)	171,35
20 кПа (0,2 кг/кв.см)	228,47
10 кПа (0,1 кг/кв.см)	342,7

Рис. 1. Окно программы инженерных расчетов МЧС

ния наблюдается при  $V > 20 \text{ м}^3$ . Отметим, что совпадение результатов по разным методикам можно считать приемлемым обычно при расхождении в пределах 10 %. Отклонения в 18 %, 36 % и 38 % уже говорят о разных результатах. Причина, скорее всего, в другом формульном аппарате, в том, что, по-видимому в программе инженерных расчетов МЧС используется упрощенная модель расчета взрыва. Также очевидно, что программа не учитывает и такой важный фактор, как снос облака ветром. Поэтому можно сделать вывод о применимости данного программного продукта только для взрыва емкостей небольшого объема — примерно до  $20 \text{ м}^3$  в безветренную погоду. При большем объеме следует рассматривать используемую в данной работе методику [6] и [7], учитывающую движение воздуха.

#### 4. Выводы по работе

По результатам проделанной работы можно сделать следующие вы-

воды:

1. Более точный прогноз последствий взрыва, приближенный к реальной ситуации, необходимо проводить по утвержденным методикам и с учетом сноса облака ветром.

2. Снос облака ветром  $\Delta L$  мало зависит от температурных показателей среды.

2. На величину  $\Delta L$  определяющее влияние оказывает класс устойчивости атмосферы.

3. При росте объема газа в 6 раз дальность сноса образующегося облака возрастает примерно в 2 раза, т. е. зависимость нелинейная.

4. Для зданий радиусы  $R_{\text{раз}}$  зон разрушения при учете сноса облака увеличиваются примерно в 5–6 раз. Зоны восстановления расширяются примерно в 2 раза. Аналогичная ситуация наблюдается и для зон с повреждением барабанных перепонок людей.

5. Программа расчета взрывов, используемая МЧС, не учитывает влияние движения воздуха и имеет точность вычислений в пределах 10 % для емкостей газа  $V \leq 20 \text{ м}^3$ . Для больших емкостей ее применение дает большую ошибку.

6. Результаты работы позволяют более приближенно к действительности предсказать последствия взрывов газовых смесей для зданий и людей.

## Список литературы

1. Рачевский Б. С. Сжиженные углеводородные газы М.: Нефть и газ, 2009. 164 с.
2. Газовозы. Автоцистерны СУГ. URL: <https://rodisgroup.ru> (дата обращения: 14.10.2020).
3. Храмов Г. Н. Горение и взрыв. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2007. 278 с.
4. Vaidogas, ER (Vaidogas, Egidijus Rytas); Kisezauskiene, L (Kisezauskiene, Lina); Girniene, I (Girniene, Ingrida). The risk to structures built near roads and rails used for moving hazardous materials // *Journal of civil engineering and management*. Volume: 22, Issue: 3, Pages: 442–455. DOI:10.3846/13923730.2015.1120773. Published: APR 2 2016. Document Type: Article.

5. **Bariha, N (Bariha, Nilambar); Mishra, IM (Mishra, Indra Mani); Srivastava, VC (Srivastava, Vimal Chandra).** The risk to structures built near roads and rails used for moving hazardous materials // *Journal of civil engineering and management*. Volume: 40, Pages: 449–460. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.01.020. Published: MAR 2016. Document Type: Article.
6. Руководство по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей». Серия 27. М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследования проблем промышленной безопасности», 2015. Вып. 15. 44 с.
7. 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).
8. **Головатая О. С., Петраков А. П., Шилов С. В.** Моделирование опасных факторов взрыва автоцистерн с сжиженным газом // *Математическое моделирование и информационные технологии: Национальная (Всероссийская) научная конференция (6–8 декабря 2018 г., г. Сыктывкар) : сборник материалов. Сыктывкар: Изд-во СГУ им. Питирима Сорокина, 2018. С. 49–51.*

### Summary

**Shilov S. V.** Simulation of explosions of gas-air mixtures taking into account the cloud drift by wind

The paper simulates the damaging effect of a shock wave during an explosion of a liquefied propane-butane mixture. Calculations were performed using two methods. The first one was used to calculate the zones of destruction of buildings and destruction of people. For the second one, the values of the drift of the gas-air mixture cloud by the wind were determined. With this in mind, the possible danger zones were much wider. Thus, the zones of destruction of buildings and damage to people due to the spread of clouds along the earth's surface increase by about five to six times. These facts must be taken into account when placing objects that use liquefied gases, as well as when transporting such gases. A probabilistic model was used to determine hazardous areas. As zones of possible destruction of buildings, such distances are conventionally accepted

at which the probability of destruction is 90 %. Similarly, for people in dangerous areas, the probability of damage to the eardrums was 90 % or higher.

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

### References

1. **Rachevsky B. S.** *Szhizhennyye uglevodorodnyye gazy* [Liquefied petroleum gases], Moscow, Oil and gas Publ, 2009, 164 p.
2. *Gazovozy. Avtotsisterny SUG* [Gas carrier. Tankers. Liquefied petroleum gas]. Available at: <https://rodisgroup.ru> (Accessed 14 October 2020).
3. **Hramov G. N.** *Goreniye i vzryv* [Burning and explosion]. Saint-Petersburg, St. Petersburg State Technical University Publ, 2007. 278 p.
4. **Vaidogas, ER (Vaidogas, Egidijus Rytas); Kisezauskiene, L (Kisezauskiene, Lina); Girniene, I (Girniene, Ingrida).** The risk to structures built near roads and rails used for moving hazardous materials, *Journal of civil engineering and management*. Volume: 22, Issue: 3, Pages: 442–455. DOI:10.3846/13923730.2015.1120773. Published: APR 2 2016. Document Type: Article.
5. **Bariha, N (Bariha, Nilambar); Mishra, IM (Mishra, Indra Mani); Srivastava, VC (Srivastava, Vimal Chandra).** The risk to structures built near roads and rails used for moving hazardous materials, *Journal of civil engineering and management*. Volume: 40, Pages: 449–460. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.01.020. Published: MAR 2016. Document Type: Article.
6. *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.
7. *RB G-05-039-96. «Rukovodstvo po analizu opasnosti avariynykh vzryvov i opredeleniyu parametrov ikh mekhanicheskogo deystviya»* [RB

G-05-039-96. «Guidelines for analyzing the danger of emergency explosions and determining the parameters of their mechanical action»] (approved. By the resolution of Gosatomnadzor of Russia of 31.12.1996 N 100).

8. **Golovataya O. S., Petrakov A. P., Shilov S. V.** Modeling of explosion hazards of liquefied gas tankers, *Matematicheskoye modelirovaniye i informatsionnyye tekhnologii: Natsional'naya (Vse-rossiyskaya) nauchnaya konferentsiya (6–8 dekabrya 2018 g., g. Syktyvkar) : sbornik materialov* [Mathematical modeling and information technologies: national (all-Russian) scientific conference (December 6–8, 2018, Syktyvkar): collection of materials]. Syktyvkar: publishing house of SSU. Pitirima Sorokina, 2018, pp. 49–51.

**Для цитирования:** Шилов С. В. Моделирование взрывов газоздушных смесей с учетом сноса облака ветром // *Вестник Сыктывкарского университета. Сер. 1: Математика. Механика. Информатика. 2021. Вып. 2 (39). С. 44–57. DOI: 10.34130/1992-2752\_2021\_2\_44*

**For citation:** Shilov S. V. Simulation of explosions of gas-air mixtures taking into account the cloud drift by wind, *Bulletin of Syktyvkar University. Series 1: Mathematics. Mechanics. Informatics, 2021, 2 (39), pp. 44–57. DOI: 10.34130/1992-2752\_2021\_2\_44*

СГУ им. Питирима Сорокина

Поступила 22.10.2020