

УДК 614.835

ОЦЕНКА ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ ВЗРЫВА С УЧЕТОМ КОЭФФИЦИЕНТА НЕГЕРМЕТИЧНОСТИ ПОМЕЩЕНИЯ И НЕАДИАБАТИЧНОСТИ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

Никишов Дмитрий Сергеевич, Хафизов Ильдар Фанилевич, Спыну Евгений Андреевич,
Колесник Артём Александрович

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация

Аннотация. Ежегодно в нашей стране случаются промышленные и бытовые взрывы газов. Только в 2024 г. до данным МЧС России произошло 32 подобных происшествия. Актуальность представленного в статье исследования заключается в том, что взрывы внутри помещений являются серьезной угрозой как для здоровья и жизни людей, находящихся внутри, так и для окружающей среды, а также причиной значительных материальных потерь. В связи с этим оценка избыточного давления взрыва является важной задачей для обеспечения безопасности и разработки соответствующих мер предотвращения и защиты.

Один из важных факторов, влияющих на силу взрыва, — степень герметичности помещения. Проведенное исследование позволяет оценить, насколько негерметичность влияет на избыточное давление взрыва, и разработать рекомендации по созданию более безопасных условий внутри помещений. Это имеет большое значение для промышленных предприятий, где риск взрывов является особенно высоким, а также для разработки нормативных документов и строительных норм.

В статье рассчитано избыточное давление взрыва по двум существующим методикам. Методика, которая рекомендована в НПБ 105-03 и СП 12.13130.2009, является основной при оценке рисков на производстве. Посредством расчета давления взрыва для аналогичных условий через тротиловый эквивалент было определено, что давление взрыва по рекомендованной методике значительно меньше возможного значения. Такая разница возникает из-за неточного определения коэффициента, учитывающего негерметичность помещения и неадиабатичность процесса горения. В результате было определено оптимальное значение этого коэффициента. Проведенное исследование может быть использовано при оценке возможных последствий взрывов с целью повышения надежности и безопасности промышленных объектов.

Ключевые слова: взрыв, избыточное давление взрыва, безопасность, коэффициент негерметичности помещения, горение, риск, утечки, промышленные объекты, газы, степень разрушения

Для цитирования: Оценка избыточного давления взрыва с учетом коэффициента негерметичности помещения и неадиабатичности процесса горения / Д. С. Никишов [и др.] // Техносферная безопасность. 2025. № 1 (46). С. 37–51.

ESTIMATION OF EXCESS EXPLOSION PRESSURE TAKING INTO ACCOUNT THE PREMISES LEAKAGE COEFFICIENT AND NON-ADIABATICITY OF THE COMBUSTION PROCESS

Dmitry S. Nikishov, Ildar F. Khafizov, Evgeny A. Spynu, Artyom A. Kolesnik
Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russian Federation

Abstract. Every year, industrial and domestic gas explosions occur in our country. Only in 2024, according to the Russian Emergencies Ministry, 32 such incidents occurred. The relevance of the research presented in the article is that explosions inside buildings are a serious threat to both the health and lives of people inside and to the environment, as well as the cause of significant material losses. Therefore, estimating the excess pressure of an explosion is an important task for ensuring safety and developing appropriate prevention and protection measures.

One of the important factors influencing the force of the explosion is the degree of tightness of the premises. The conducted research makes it possible to estimate the extent to which leakage affects the excess pressure of an explosion, and to work out recommendations for creating safer conditions inside premises. This is of great importance for industrial enterprises, where the risk of explosions is especially high, as well as for the development of regulatory documents and building codes.

The article calculates the excess explosion pressure using two existing methods. The method recommended in NPB 105-03 and SP 12.13130.2009 is the main risk factor in production. By calculating the explosion pressure for similar conditions using the TNT equivalent, it was determined that the explosion pressure according to the recommended method is significantly less than the possible value. This difference occurs due to the inaccurate determination of the coefficient taking into account the leakage of the premises and the non-adiabatic nature of the combustion process. As a result, the optimal value of this coefficient was determined. The conducted research be used to estimate the possible consequences of explosions in order to improve the reliability and safety of industrial facilities.

Keywords: explosion, explosion overpressure, safety, leakage coefficient of the premises, combustion, risk, leakage, industrial facilities, gases, degree of destruction

For Citation. Estimation of the explosion overpressure taking into account the coefficient of room leakage and nonadiabaticity of the combustion process / D. S. Nikishov et al. // Technospheric safety. 2025. № 1 (46). pp. 37–51.

Введение

Существует несколько методов оценки избыточного давления взрыва, каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения. Одним из основных методов яв-

ляется метод численного моделирования, который позволяет учитывать множество факторов, таких как характеристики взрывчатого вещества, геометрия помещения, условия окружающей среды и др. Для численного моделирования используются раз-

личные программные комплексы, такие как TOXI+Risk 5, FLACS, CFD и др., которые основаны на решении уравнений гидродинамики и теплопередачи.

Однако, несмотря на преимущества метода численного моделирования, его использование требует значительных вычислительных ресурсов и времени. Кроме того, для правильной оценки избыточного давления необходимо иметь достоверные данные о характеристиках взрывчатого вещества, его концентрации в помещении, а также о других параметрах. В некоторых случаях они могут быть недоступны или неполны, что может привести к неточным результатам [1].

Еще одним методом оценки избыточного давления взрыва является метод эмпирических формул, основанный на экспериментальных данных, полученных путем проведения взрывных испытаний. По их результатам разрабатываются формулы, позволяющие оценить избыточное давление взрыва в зависимости от различных факторов, таких как мощность взрыва, расстояние до источника взрыва, характеристики помещения и др.

Однако использование эмпирических формул имеет свои ограничения. Во-первых, такие формулы могут быть разработаны только для определенного класса взрывов и условий, и их применение для других случаев может быть неправильным. Во-вторых, экспериментальные данные могут быть недостаточно точными или неполными, что также может привести к неточным результатам. Кроме того, эмпирические формулы не учитывают влияние таких факторов, как геометрия помещения, условия окружающей среды и др., что способно существенно влиять на избыточное давление взрыва.

В настоящее время многие авторы занимаются исследованиями избыточного давления взрыва. В научной статье Тетерина И. А. и Сулименко В. А. «Влияние загроможденности на избыточное давление взрыва паров сжиженного природного газа» [1] было выявлено, что увеличение процентного содержания пропан-бутана в смеси метан/пропан/бутан/воздух приводит к линейному увеличению максимального избыточного давления взрыва при наличии преград. Однако обозначенное исследование давления взрыва проводится без учета влияния коэффициента негерметичности помещения (K_H).

Также исследованиями в указанной области занимались Горев В. А. и Корольченко А. Д. в научной статье «Влияние легкосбрасываемых конструкций на избыточное давление при взрыве в помещении» [2]. Авторами было выявлено влияние на конечный результат отдельных факторов, таких как объем помещения; давление, при котором легкосбрасываемая конструкция начинает движение; масса и глубина установки легкосбрасываемой конструкции в проеме; периметр проема и скорость взрывного горения. Проведенное исследование подробно описывает влияние избыточного давления на материалы и конструкции, но также не учитывает влияние K_H помещения.

Методология

Первый этап — определение целей и задач исследования. Так, основной целью настоящей статьи является оценка избыточного давления взрыва в помещении с учетом K_H .

Вторым этапом методологии исследования является анализ предметной области. Для оценивания избыточного давления взрыва в помещении с учетом K_H необхо-

димо изучить основные принципы взрывной безопасности, особенности поведения взрывных волн в помещении, а также рассмотреть существующие методы и модели, позволяющие достичь поставленной цели. Таким образом получится сформировать полное представление о предмете исследования и выбрать наиболее подходящую математическую модель.

На третьем этапе выбирается математическая модель для оценки избыточного давления взрыва, позволяющая учесть основные физические процессы, происходящие во время взрыва, такие как сжатие газа, расширение взрывной волны и взаимодействие с преградами в помещении. Кроме того, в модель должен быть включен K_H , который учитывает возможные утечки газа из помещения и влияние на избыточное давление.

Таким образом, методология исследования для оценки избыточного давления взрыва в помещении с учетом K_H содержит определение целей и задач исследования, анализ предметной области и выбор математической модели. Каждый этап требует тщательной проработки и учета всех факторов, влияющих на оценку избыточного давления. Такой подход позволит получить

достоверные результаты и сделать важные выводы по вопросам взрывной безопасности в помещении.

В соответствии с СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности» K_H — коэффициент, учитывающий негерметичность помещения и неадиабатичность процесса горения, — допускается принимать равным трем независимо от наличия или отсутствия аварийной вентиляции и других параметров.

Таким образом, поставленный вопрос является не до конца решенным. Уточнение значения K_H может значительно повлиять на общую оценку взрывопожаробезопасности помещения.

Результаты

Для обозначения степени влияния K_H на величину избыточного давления взрыва необходимо определить избыточное давление взрыва по аналогичным методикам, которые не учитывают K_H .

Определим для примера давление взрыва метана в помещении размером 15×15×5 м.

Определим полный объем помещения V :

$$V = 15 \cdot 15 \cdot 5 = 1125 \text{ м}^3. \quad (1)$$

Определим массу воздуха M_g в помещении:

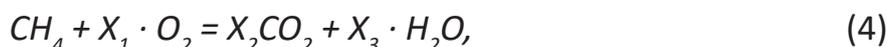
$$M_g = \rho \cdot V = 1,3 \cdot 1125 = 1462,5 \text{ кг}, \quad (2)$$

где ρ — плотность воздуха, равная 1,3 кг/м³.

Тогда масса кислорода M_k в помещении (с учетом содержания кислорода в воздухе 23 %) будет равна:

$$M_k = 0,23 \cdot M_g = 0,23 \cdot 1462,5 = 336,38 \text{ кг.} \quad (3)$$

Запишем уравнение реакции окисления метана:



где X_1, X_2, X_3 , — неизвестные коэффициента.

Баланс углерода $C:1 = X_2$.

Баланс водорода $H:4 = 2 \cdot X_3$, тогда $X_3 = 2$.

Баланс кислорода $O:2 \cdot X_1 = 2 \cdot X_2 + X_3$, тогда $X_1 = X_2 + X_3/2$.

Подставим X_2 и X_3 в $X_1 = X_2 + X_3/2$, получим $X_1 = 2$.

Тогда уравнение реакции окисления с коэффициентами будет выглядеть:



Относительные молекулярные массы атомов найдем в периодической системе химических элементов:

$$\mu(H) = 1; \mu(C) = 12; \mu(O) = 12. \quad (6)$$

Относительные массы молекул:

$$\mu(CH_4) = 16; \mu(O_2) = 32. \quad (7)$$

Пусть X — массовое соотношение кислорода/метана в реакции окисления:

$$X = \frac{2 \cdot \mu(O_2)}{\mu(CH_4)} = \frac{2 \cdot 32}{16} = 4. \quad (8)$$

Определим массу метана:

$$M_{\Gamma} = \frac{M_k}{X} = \frac{336,38}{4} = 84,1 \text{ кг.} \quad (9)$$

Определим количество энергии при окислении найденной массы метана (теплота сгорания метана $q_m = 44$ мДж/кг):

$$E = q_m \cdot M_{\Gamma} = 44 \cdot 84,1 = 3700,4 \text{ мДж.} \quad (10)$$

Определим массу тротила, которая будет выделять такое же количество энергии (энергия взрыва тротила $q_m = 4,5$ мДж/кг):

$$M_T \cdot q_T = E; M_T = \frac{E}{q_T} = \frac{3700,4}{4,5} = 822,3 \text{ кг} \quad (11)$$

Найдем избыточное давление при взрыве тротила массой 822,3 кг.

$$\Delta p = p - p_0, \quad (12)$$

где p — давление на фронте ударной волны;

p_0 — атмосферное давление (101 кПа).

Определим приведенный радиус зоны взрыва по формуле:

$$\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{2 \cdot K \cdot M \cdot T_9}}, \quad (13)$$

где R — расстояние от центра взрыва, м;

M — масса заряда, кг;

K — коэффициент, который учитывает характер подстилающей поверхности. Для металла он равен 1,0; для бетона — 0,95; для дерева — 0,8; для грунта — 0,6;

T_9 — тротильный эквивалент взрывчатого вещества.

Определим давление взрыва, при этом в зависимости от найденного значения \bar{R} используются две разные формулы. Для значений $\bar{R} \leq 6,2$ необходимо пользоваться следующей формулой:

$$\Delta p = \frac{7}{3} \left(\sqrt{1 + \bar{R}^3} - 1 \right)^{-1}, \text{ кПа}. \quad (14)$$

Для значений $\bar{R} > 6,2$ формула имеет следующий вид:

$$\Delta p = \frac{70}{\bar{R}} \left(\sqrt{\lg \bar{R}} - 0,322 \right)^{-1}, \text{ кПа}. \quad (15)$$

Определим приведенный радиус зоны взрыва:

$$\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{2 \cdot K \cdot M \cdot T_9}} = \frac{1}{\sqrt[3]{2 \cdot 0,95 \cdot 822,3 \cdot 1}} = 0,09. \quad (16)$$

Поскольку $\bar{R} \leq 6,2$, то для расчета воспользуемся следующей формулой:

$$\Delta p = \frac{7}{3} \left(\sqrt{1 + \bar{R}^3} - 1 \right)^{-1} = \frac{7}{3} \left(\sqrt{1 + 0,09^3} - 1 \right)^{-1} = 6,41 \text{ мПа}. \quad (17)$$

Как видно, избыточное давление взрыва составит 6,41 мПа при взрыве метана массой 84,1 кг.

Проведем расчет по общепринятой методике, которая изложена в НПБ 105-03 и СП 12.13130.2009 для условий из предыдущего расчета.

Найдем коэффициент β — стехиометрический коэффициент кислорода в реакции сгорания по следующей формуле:

$$\beta = n_C + \frac{n_H - n_X}{4} - \frac{n_O}{2}, \quad (18)$$

где n_C, n_H, n_O, n_X — число атомов С, Н, О и галоидов в молекуле горючего;



$$\beta = n_C + \frac{n_H - n_X}{4} - \frac{n_O}{2} = 1 + \frac{4 - 0}{4} - 0 = 2. \quad (20)$$

Найдем C_{cm} — стехиометрическую концентрацию метана по формуле:

$$C_{CT} = \frac{100}{1 + 4,84 \cdot \beta} = \frac{100}{1 + 4,84 \cdot 2} = 9,36 \%. \quad (21)$$

Определим плотность метана при расчетной температуре t_p , кг/м³ по следующей формуле:

$$\rho_{\Gamma} = \frac{M}{V_0 \cdot (1 + 0,00367 \cdot t_p)} = \frac{16,04}{22,413 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 61)} = 0,585 \text{ кг/м}^3, \quad (22)$$

где M — молярная масса, кг/кмоль;

V_0 — молярный объем, равный 22,413 м³/кмоль;

t_p — расчетная температура, °С.

В методике указано: если не удастся определить расчетную температуру, то следует принять ее равной 61 °С.

Свободный объем — это объем помещения минус объем пространства, занятого технологическим оборудованием. Допускается принимать $V_{ce} = 0,8 \cdot V_{пом}$, если неизвестен объем пространства, занятого технологическим оборудованием.

Избыточное давление взрыва ΔP определяется по следующей формуле:

$$\Delta P = (P_{max} - P_0) \cdot \frac{m \cdot Z \cdot 100}{V_{CB} \cdot \rho_{\Gamma} \cdot C_{СТХ} \cdot K_H}, \quad (23)$$

где P_{max} — максимальное давление взрыва стехиометрической смеси, если определить невозможно, допускается принимать $P_{max} = 900$ кПа;

P_0 — начальное давление, кПа, допускается принимать $P_0 = 101$ кПа;

m — масса горючего газа, кг;

Z — коэффициент участия горючего во взрыве, является справочной величиной, для метана равен $Z = 0,5$.

V_{CB} — свободный объем помещения, м³;

K_H — коэффициент, учитывающий негерметичность помещения и неадиабатичность процесса горения, допускается принимать $K_H = 3$.

Подставив все необходимые значения, определим избыточное давление взрыва:

$$\Delta P = (900 - 101) \cdot \frac{84,1 \cdot 0,5 \cdot 100}{1125 \cdot 0,8 \cdot 0,585 \cdot 9,36 \cdot 3} = 227 \text{ кПа}. \quad (24)$$

Таким образом, расчет по методике, изложенной в НПБ 105-03 и СП 12.13130.2009, показывает, что при взрыве метана массой 84,1 кг избыточное давление взрыва составит 0,23 МПа.

Проведем расчет для таких же условий, но изменяя K_H (табл. 1).

На рис. 1 представлено влияние K_H на избыточное давление взрыва. На рис. 2 отмечены зоны поражения, рассчитанные по первой методике. На рис. 3 обозначены зоны поражения при расчете по методике, изложенной в НПБ 105-03 и СП 12.13130.2009. Сравнение рис. 2 и рис. 3 представлено в табл. 2.

Таблица 1
Изменение K_H для взрыва 84,1 кг метана

Table 1
Change in the leakage coefficient for an explosion of 84,1 kg of methane

Номер расчета Calculation number	Значение K_H Value of leakage coefficient	Избыточное давление взрыва, МПа Explosion overpressure, MPa
1	5,0	0,136
2	4,0	0,170
3	3,0	0,227
4	2,0	0,341
5	1,0	0,682
6	0,5	1,364
7	0,4	1,704
8	0,3	2,273
9	0,2	3,409
10	0,1	6,818

Окончание таблицы 1

Номер расчета Calculation number	Значение K_n Value of leakage coefficient	Избыточное давление взрыва, МПа Explosion overpressure, MPa
11	0,09	7,575
12	0,08	8,522
13	0,07	9,740
14	0,06	11,363
15	0,05	13,635

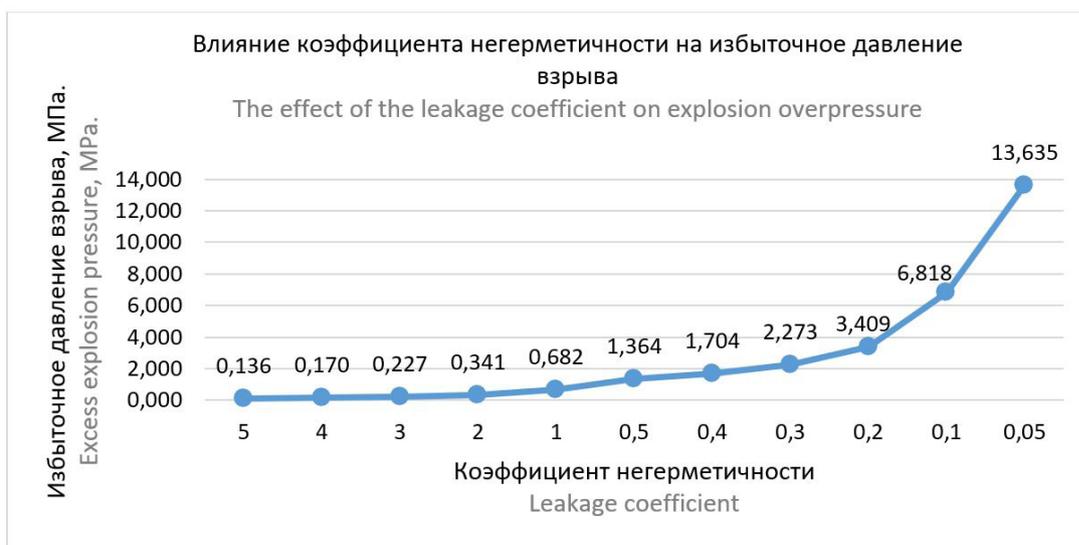


Рис. 1. Влияние K_n на избыточное давление взрыва
Fig.1. The effect of the leakage coefficient on the explosion overpressure

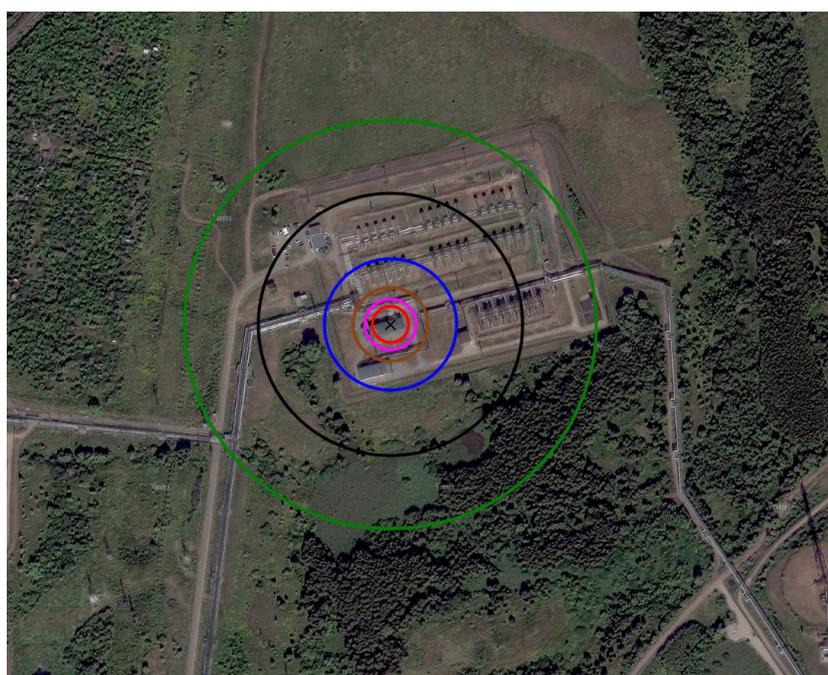


Рис. 2. Зоны поражения, рассчитанные по первой методике
Fig. 2. Affected areas calculated using the first method

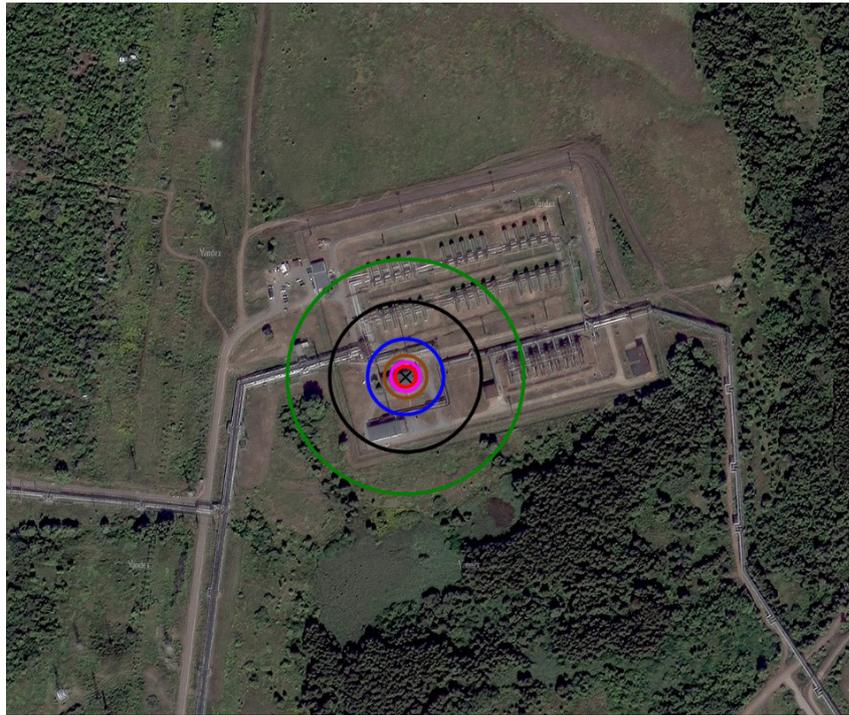


Рис. 3. Зоны поражения, рассчитанные по методике, изложенной в НПБ 105-03 и СП 12.13130.2009
 Fig. 3. Affected areas calculated using the method described in NPB 105-03 and SP 12.13130.2009

Таблица 2
Сравнение зон поражения, рассчитанных по первой методике и по методике, изложенной в НПБ 105-03 и СП 12.13130.2009

Table 2
 Comparison of the affected areas calculated using the first method and the method described in NPB 105-03 and SP 12.13130.2009

Степень повреждения Degree of damage	Избыточное давление P, кПа Overpressure P, kPa	Радиус зоны, определенный по первой методике, м Radius of the area, determined by the first method, m	Радиус зоны, определенный по методике НПБ 105-03 и СП 12.13130.2009, м Radius of the area, determined by the method NPB 105-03 and SP 12.13130.2009, m
Полное разрушение зданий Total destruction of buildings	100	20,4	10,1
50 %-е разрушение зданий 50 % destruction of buildings	53	28,6	14,2
Средние повреждения зданий Average damage to buildings	28	41,7	20,7

Окончание таблицы 2

Степень повреждения Degree of damage	Избыточное давление Р, кПа Overpressure P, kPa	Радиус зоны, определенный по первой методике, м Radius of the area, determined by the first method, m	Радиус зоны, опре- деленный по ме- тодике НПБ 105-03 и СП 12.13130.2009, м Radius of the area, determined by the method NPB 105-03 and SP 12.13130.2009, m
Умеренные поврежде- ния зданий (поврежде- ние внутренних пере- городок, рам, дверей и т. п.) Moderate damage to buildings (damage to internal partitions, frames, doors, etc.)	12	74,3	36,8
Нижний порог повреж- дения человека волной давления The lower threshold of damage to a person by a pressure wave	5	148,4	73,5
Малые повреждения (разбита часть остекления) Minor damage (part of the glass is broken)	3	231,2	114,5

Таким образом, проведенный расчет показывает, что по методике, изложенной в НПБ 105-03 и СП 12.13130.2009, давление взрыва может быть занижено более чем в 30 раз. Все параметры в методике являются расчетными и не могут быть подвергнуты изменениям, кроме K_H помещения. Итоговое давление взрыва начинает соотноситься при уменьшении K_H до значения 0,1.

На рис. 2 и 3 видно, что зоны поражения, рассчитанные по методике, изложенной в НПБ 105-03 и СП 12.13130.2009, уменьшаются примерно в 2 раза. Таким образом, существующая методика оценки занижает возможные последствия при взрывах.

Обсуждение

В статье проведено сравнение двух существующих методик оценки избыточного давления взрыва. Несмотря на то, что в последние годы многие исследования нацелены на повышение безопасности объектов при взрывах, исследований в области определения давления взрыва практически нет.

В работе определено, что существующий метод оценки избыточного давления значительно занижает реальные результаты. Такое упущение может привести к серьезным последствиям, выраженным в человеческих жертвах и недооценивании степени возможных разрушений при авариях.

На рис. 1 видно, что при значении коэффициента от 5 до 1 происходит незначительное изменение избыточного давления. Поэтому, исходя из предыдущих расчетов и рис. 1, необходимо пересмотреть значение K_H . Его значение при оценке избыточного давления должно быть в пределах от 0,5 до 0,1. Так, при средней степени его влияния на избыточное давление значение находится именно в этом диапазоне. Расчет, в котором был оценен тротиловый эквивалент взрыва, подтверждает необходимость использования значения K_H именно в этом диапазоне. Обозначенная тема требует еще более подробного исследования для уточнения значения K_H , чтобы более точно можно было проводить оценку избыточного давления взрыва.

Выводы

В статье показана несовершенство методики, которая рекомендована в НПБ 105-03 и СП 12.13130.2009. Было определено влияние коэффициента, учитывающего негерметичность помещения и неадиабатичность процесса горения, а также оптимальное его значение, которое следует принимать в расчетах. Благодаря исследованию можно более точно определить параметры взрыва, что, в свою очередь, позволяет подобрать оптимальные методы защиты оборудова-

ния и зданий, а также определить безопасное расстояние от эпицентра взрыва.

Необходимо продолжать исследования для более точного определения коэффициента, учитывающего негерметичность помещения и неадиабатичность процесса горения.

При проведении дальнейших исследований важно использовать математические модели, которые учитывают не только величину избыточного давления, но и динамику его изменения во времени исходя из воздействия негерметичности. Это позволяет более точно предсказать последствия взрыва и спроектировать эффективные меры по предотвращению аварий.

Применение современных программных комплексов для моделирования взрывных процессов позволяет аналитикам увидеть, как различные параметры, включая K_H , влияют на давление и разрушение. Такие исследования становятся основой для разработки рекомендаций по проектированию безопасных установок и организации рабочего пространства.

В заключение следует сказать, что изучение избыточного давления взрыва с учетом K_H является актуальной задачей для повышения безопасности на производстве. Это исследование требует комплексного подхода, включающего математическое моделирование и анализ, что обеспечивает более глубокое понимание процессов, происходящих в условиях взрыва.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тетерин И. А., Сулименко В. А. Влияние загроможденности на избыточное давление взрыва паров сжиженного природного газа // VIII Международная научно-практическая конфе-

ренция, посвященная Всемирному дню гражданской обороны «Гражданская оборона на страже мира и безопасности». 2024. С. 314–319.

2. Горев В. А., Корольченко А. Д. Влияние легкосбрасываемых конструкций на избыточное давление при взрыве в помещении // Пожаровзрывобезопасность. 2022. Т. 31, № 3. С. 12–23.

3. Моделирование аварийных выбросов взрывоопасных веществ в помещении / А. А. Комаров [и др.] // Вестник МГСУ. 2014. № 10. С. 132–140.

4. Буюкевич А. Л. Определение расчетного избыточного давления взрыва в помещениях с обращением горючих пылей // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. 2015. Т. 10, № 1. С. 56–61.

5. Голиков А. В., Субботин Д. И., Куранов Д. В. Оценка достоверности расчетных моделей несущего каркаса трубчатых печей // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. № 3. С. 18–33.

6. Исаев А. А. Особенности применения информационно-экспертных систем в анализе пожарной опасности бинарных жидкостей // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2014. Т. 2, № 1 (5). С. 212–215.

7. Колесников Е. Ю. Неопределенность оценок взрывоопасности на примере текстильных производств // Безопасность труда в промышленности. 2017. № 11. С. 23–29.

8. Экспериментальное исследование и численное моделирование процесса образования взрывоопасной метановоздушной смеси в помещениях / А. А. Комаров [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2015. Т. 24, № 4. С. 30–38.

9. Овчинникова Л. А., Назымов Е. В. Пожарная безопасность помещений хранения и технического обслуживания газобалонных автомобилей // Актуальные проблемы агропромышленного комплекса. 2018. С. 172–176.

10. Стасева Е. В., Курьята Р. В., Панькова А. В. Анализ и оценка промышленной безопасности объекта газоснабжения — газораспределительная станция // Техносферная безопасность, надежность, качество, энерго- и ресурсосбережение : материалы XXII Междунар. науч.-практ. конф., Ростов-на-Дону — Новомихайловский, 7–11 сентября 2020 г. 2020. Т. 22. С. 285.

11. Шульга Т. Э., Никулина Ю. В. Категорирование помещений по взрывопожарной и пожарной опасности на основе онтологического моделирования // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2021. № 56. С. 112–118.

REFERENCES

1. Teterin I. A., Sulimenko V. A. Influence of clogging on overpressure of liquefied natural gas vapor explosion // VIII International Scientific and Practical Conference dedicated to the World Day of Civil Defense “Civil Defense at the Guard of Peace and Security”. 2024. pp. 314–319.

2. Gorev V. A., Korolchenko A. D. Influence of the light-loaded structures on the overpressure during an explosion in the room // Pozharovzryvozasnost. 2022. T. 31, № 3. pp. 12–23.

3. Modeling of emergency emissions of explosive substances in the room / A. A. Komarov et al. // Vestnik MSCU. 2014. № 10. pp. 132–140.

4. Buyakevich, A. L. Determination of the calculated overpressure of the explosion in the premises with the handling of combustible dusts // *Emergency situations: education and science*. 2015. Т. 10, № 1. pp. 56–61.
5. Golikov A. V., Subbotin D. I., Kuranov D. V. Assessment of the reliability of calculation models of the load-bearing frame of tubular furnaces // *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2020. № 3. pp. 18–33.
6. Isaev A. A. Features of the application of information and expert systems in the analysis of fire hazard of binary liquids // *Fire safety: problems and prospects*. 2014. Т. 2, № 1 (5). pp. 212–215.
7. Kolesnikov E. Yu. Uncertainty of explosion hazard estimates on the example of textile production // *Labor Safety in Industry*. 2017. № 11. pp. 23–29.
8. Experimental study and numerical modeling of the process of explosive methane-air mixture formation in the premises / A. A. Komarov et al. // *Pozharovzryvozasnost*. 2015. Т. 24, № 4. pp. 30–38.
9. Ovchinnikova L. A., Nazymov E. V. Fire safety of storage and maintenance facilities of gas-powered cars // *Actual problems of agroindustrial complex*. 2018. pp. 172–176.
10. Staseva E. V., Kuryata R. V., Pankova A. V. Analysis and assessment of industrial safety of gas supply object — gas distribution station // *Technosphere safety, reliability, quality, energy and resource saving : proceedings of the XXII International Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don — Novomikhailovskiy, September 7–11, 2020*. 2020. Т. 22. P. 285.
11. Shulga T. E., Nikulina Y. V. Categorization of premises by explosion and fire hazard on the basis of ontological modeling // *Izvestiya St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)*. 2021. № 56. pp. 112–118.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Никишов Дмитрий Сергеевич, аспирант кафедры пожарной и промышленной безопасности Уфимского государственного нефтяного технического университета (450064, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1); ResearcherID: rid101099; ORCID: 0009-0005-6007-2633; e-mail: nikishov_2018@mail.ru

Хафизов Ильдар Фанилевич, д-р техн. наук, профессор кафедры пожарной и промышленной безопасности Уфимского государственного нефтяного технического университета (450064, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1); РИНЦ ID: 592403; Scopus Author ID: 25632404900; e-mail: ildar.hafizov@mail.ru

Спыну Евгений Андреевич, аспирант кафедры пожарной и промышленной безопасности Уфимского государственного нефтяного технического университета (450064, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1); e-mail: pkrb@mail.ru

Колесник Артём Александрович, старший преподаватель кафедры пожарной и промышленной безопасности Уфимского государственного нефтяного технического университета (450064, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1); РИНЦ ID: 862655; e-mail: pkrb@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitry S. Nikishov, postgraduate student of the Department of Fire and Industrial Safety, Ufa State Petroleum Technical University (1 Cosmonautov str., Ufa, 450064, Russian Federation); ResearcherID: rid101099; ORCID: 0009-0005-6007-2633; e-mail: nikishov_2018@mail.ru

Ildar F. Khafizov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Fire and Industrial Safety, Ufa State Petroleum Technical University (1 Cosmonautov str., Ufa, 450064, Russian Federation); RSCI ID: 592403; Scopus Author ID: 25632404900; e-mail: ildar.hafizov@mail.ru

Evgeny A. Spynu, postgraduate student of the Department of Fire and Industrial Safety Ufa State Petroleum Technical University (1 Cosmonautov str., Ufa, 450064, Russian Federation); e-mail: pkpb@mail.ru

Artem A. Kolesnik, Senior Lecturer, Department of Fire and Industrial Safety, Ufa State Petroleum Technical University (1 Cosmonautov str., Ufa, 450064, Russian Federation); RSCI ID: 862655; e-mail: pkpb@mail.ru

Поступила в редакцию 05.02.2025
Одобрено после рецензирования 14.02.2025
Принята к публикации 14.03.2025