

Оригинальная статья

УДК 502/504:533.66:622.325.5:532.5

DOI: 10.26897/1997-6011-2022-1-84-92

ВОЗДЕЙСТВИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПОТОКОВ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ АВАРИЙНЫЕ ВЗРЫВЫ, НА ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

КОМАРОВ АЛЕКСАНДР АНДРЕЕВИЧ , д-р техн. наук, профессор
bzbb@mail.ru

БАЖИНА ЕЛЕНА ВИТАЛЬЕВНА , канд. техн. наук, доцент
BazhinaEV@mgsu.ru

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, Россия

На примере реального взрывоопасного объекта рассматривается методология определения максимальной динамической нагрузки, формирующейся при аварийном взрыве. Показано, что в качестве источника взрывной опасности следует рассматривать дефлаграционный взрыв газозооушной смеси, которая принципиально может сформироваться при аварийной ситуации на территории предприятия. Показано, что при дефлаграционном взрыве, который характеризуется плавным нарастанием взрывного давления, происходит обтекание зданий взрывной волной. Поэтому значительное усиление взрывных нагрузок на фасадах зданий, что связано с эффектом отражения волны сжатия, происходить не будет. Плавное нарастание взрывного давления приводит к значительному уменьшению коэффициента динамичности. Указанные особенности развития взрывной аварии необходимо учитывать при оценке потенциальной опасности аварийного взрыва. Описывается расчетная схема, позволяющая проводить вычисления динамической нагрузки, которая формируется при дефлаграционном аварийном взрыве. В основе расчетного метода лежат линеаризованные уравнения движения сплошной среды. Возможность использования линеаризованных уравнений движения связана с малостью видимой скорости пламени, реализуемой при дефлаграционных взрывах углеводородов. Дополнительным преимуществом использования акустического приближения является возможность проводить расчет вибрационных или акустических нагрузок. Приводится расчетная схема, позволяющая заменять динамическую нагрузку эквивалентной статической, что необходимо при проектировании во взрывоустойчивом варианте зданий, находящихся на территории взрывоопасных объектов.

Ключевые слова: аварийный взрыв, взрывоопасный объект, взрывное давление, детонационный взрыв, огненный шар, волновая энергия

Формат цитирования: Комаров А.А., Бажина Е.В. Воздействие газодинамических потоков, сопровождающих аварийные взрывы, на здания и сооружения // Природообустройство. – 2022. – № 1. – С. 84-92. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-1-84-92.

© Комаров А.А., Бажина Е.В., 2022

Original article

IMPACT OF GAS-DYNAMIC FLOWS ACCOMPANYING EMERGENCY EXPLOSIONS ON BUILDINGS AND STRUCTURES

KOMAROV ALEXANDER ANDREEVICH , professor, doctor of technical sciences
bzbb@mail.ru

BAZHINA ELENA VITALIEVN , candidate of technical sciences
BazhinaEV@mgsu.ru

National Research Moscow State University of Civil Engineering" (NRU MGSU), 129337, Moscow, Yaroslavl Highway, 26, Russia

In the article, using the example of a real explosive object, the methodology for determining the maximum dynamic load that forms during an emergency explosion is considered. The article shows that when determining the load from an emergency explosion, it should be considered that a deflagration

explosion of a gas-air mixture occurs. It should be accepted that only a certain part of the combustible substance is involved in the explosion, which is determined as a result of solving the diffusion problem. Detonation explosion should be excluded from sources of explosive danger. A detonation explosion at enterprises using hydrocarbons can occur with a powerful ignition source, such as lightning, a voltaic arc, or a TNT stick. These sources of mixture initiation must be excluded by engineering or organizational measures. It is shown that during a deflagration explosion, which is characterized by a smooth increase in explosive pressure, an explosive wave flows around buildings. Therefore, a significant increase in explosive loads on the facades of buildings, which is associated with the effect of reflection of a compression wave, will not occur. In addition, a smooth increase in explosive pressure leads to a significant decrease in the dynamic coefficient. These features of the development of an explosive accident must be taken into account when assessing the potential danger of an emergency explosion. The article describes a design scheme that allows calculating the dynamic load that is formed during a deflagration emergency explosion. The calculation method is based on linearized equations of motion of a continuous medium. The possibility of using linearized equations of motion is associated with the smallness of the apparent flame velocity realized during deflagration explosions of hydrocarbons. An additional advantage of using the acoustic approximation is the ability to calculate vibration or acoustic loads. A calculation scheme is presented that allows replacing the dynamic load with an equivalent static one, which is necessary when designing in an explosion-proof version of buildings located on the territory of explosive objects.

Keywords: emergency explosion, explosive object, explosive pressure, detonation explosion, fireball, wave energy

Format of citation: Komarov A.A., Bazhina E.V. The impact of gas-dynamic flows accompanying emergency explosions on buildings and structures // Prirodoobustrojstvo. – 2022. – № 1. – S. 84-92. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-1-84-92.

Введение. При строительстве энергоемких и взрывоопасных объектов предполагается, что они должны быть устойчивыми по отношению к возможным взрывным воздействиям. Возникновение любой аварийной ситуации на объекте подразумевает сочетание маловероятных событий, реализация которых не предусматривалась и не предполагалась ни эксплуатационными службами, ни проектирующими организациями. Несмотря на это требование возведения взрывоустойчивых объектов предполагает необходимость определения максимальных нагрузок, которые могут реализоваться при аварийной ситуации на объекте. Поэтому при определении предполагаемого воздействия на строительные объекты воздушных волновых потоков, сопровождающих аварийные взрывы, необходимо сформулировать основные принципы развития аварийной ситуации, приводящей к нагрузкам с максимальной для данного объекта разрушающей способностью. В статье на примере реального взрывоопасного объекта рассмотрены основные принципы определения максимального воздействия на строительные конструкции воздушных волновых потоков, сопровождающих аварийные взрывы на рассматриваемом объекте.

Материалы и методы исследований. Нормативные документы по определению последствий аварийных взрывов [1] базируются на методике, разработанной в НИЦ «Промышленная безопасность» [2], и предполагают

существенное завышение расчетных значений взрывных нагрузок по сравнению с реальными. Это достигается путем значительного упрощения расчетных соотношений, что позволяет ими пользоваться сотрудникам, которые не имеют специальной подготовки в области взрывного горения и воздействия динамических нагрузок на строительные конструкции.

Для упрощения схематизации процесса аварийного взрыва используется понятие энергетического потенциала взрывоопасного облака, что справедливо для расчетов параметров детонационных взрывов. При прогнозировании параметров дефлаграционных взрывов, которые реализуются в подавляющем большинстве аварий, использование энергетического потенциала приводит к значительному расширению диапазонов видимой скорости пламени, являющейся основным параметром, ответственным за взрывное давление. В связи с этим прогнозируемые по методике [1] параметры взрывной нагрузки фактически соответствуют параметрам детонационных взрывов, то есть априори предполагается, что на объектах при аварии происходит детонация газопаровоздушных облаков. Если при использовании указанного, достаточно консервативного метода оценки параметров взрывных нагрузок [1], обеспечивается безопасность зданий, сооружений и людей, то отпадает необходимость в более точных и трудоемких расчетах, требующих у исполнителей

более серьезной подготовки в области взрыво-безопасности. В противном случае необходима более детальная проработка вопроса формирования на объекте взрывных нагрузок и вопроса их воздействия на строительные конструкции.

Результаты и их обсуждение. Проанализируем последствия взрывной аварии на рассматриваемой установке. При выполнении предварительных расчетов принимается, что энергетический потенциал аварийного выброса составляет $E = 2.9 \cdot 10^{10}$ кДж, а коэффициент участия во взрыве равен 0.1 (исходные данные соответствуют реальному объекту).

На рисунке 1 приведены расчетные зависимости взрывного давления в проходящей воздушной ударной волне (далее – ВУВ), формирующейся при детонационном взрыве аварийного выброса горючих веществ на установке с энергетическим потенциалом $E = 2.9 \cdot 10^9$ кДж. Под проходящей ВУВ понимается волна без учета ее взаимодействия со зданиями и сооружениями, находящимися на ее пути, которые приводят к ее ослаблению, о чем сказано ниже, в том числе без учета ее отражения от фасада здания, на который воздушная ударная волна воздействует. Расчеты выполнены согласно рекомендациям [1]. Расстояния от установки до точек наблюдения, приведенные на рисунке 1, соответствуют расстояниям, на которых расположены фасады зданий реального объекта.

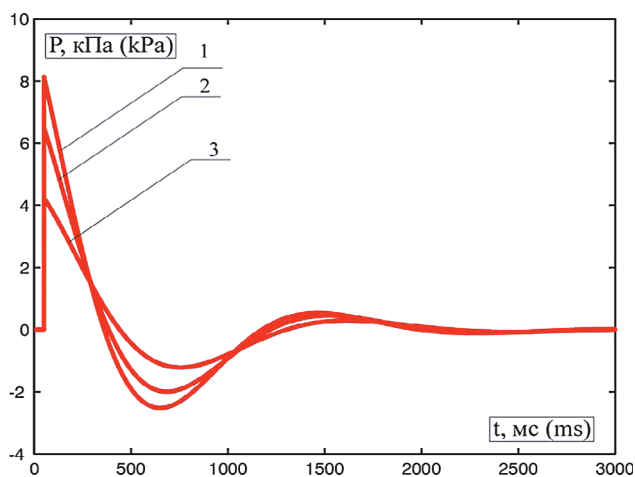


Рис. 1. Динамические параметры взрывного давления на расстояниях:
1 – 800.40 м; 2 – 984.40 м; 3 – 1574.40 м от установки при детонационном взрыве

Fig. 1. Dynamic parameters of the explosive pressure at the distances:
1 – 800.40 m; 2 – 984.40 m and 3 – 1574.40 m from the installation during the detonation explosion

На расстояниях 800.40 м; 984.40 м и 1574.40 м от установки находятся фасады зданий

реального объекта. Из приведенных результатов расчета следует, что максимальные давления в проходящей ВУВ составят 8.1 кПа, 6.5 кПа и 4.2 кПа. Тогда, с учетом коэффициента отражения от фасада зданий, например, согласно рекомендациям ЦНИИпромзданий, это не менее $K_r = 2.4$, а с учетом коэффициента динамичности $K_d = 2.0$ (даже для слабых ударных волн). Получаем, что эквивалентные статические нагрузки на фасады зданий будут составлять 38.9 кПа, 31.2 кПа и 20.2 кПа, которые существенно превышают несущую способность типовых зданий. Напомним, что 10 кПа составляет около 1 т веса на 1 кв. м. Однако, как указывалось выше, полученные значения взрывных нагрузок по методикам [1] дают существенно завышенные значения, что связано со значительной схематизацией процесса аварийного взрыва на установке. Поэтому ниже рассмотрены результаты более подробных расчетов, основанных на более достоверных методах.

Как указывалось выше, полученные по методикам [1, 2] значения взрывного давления в проходящей взрывной волне имеют тенденцию значительного завышения. Связано это с методикой, имеющей эмпирический характер, в основу которого положен энергетический принцип моделирования аварийного взрыва, что справедливо только для детонации. Кроме того, временная зависимость взрывного давления в данной методике принимается как при детонации, то есть в методике принято, что всегда происходит вырождение волны сжатия (ВС), которая формируется при дефлаграционном взрыве, в воздушную ударную волну (ВУВ).

В действительности максимальная волна сжатия (проходящая), которая может сформироваться при дефлаграционном взрыве на установке, имеет вид, приведенный на рисунке 2.

Расчеты проведены по методике, наиболее точно описывающей физический процесс формирования взрывной волны при дефлаграционном взрыве с дозвуковой скоростью распространения пламени [3-7]. Дефлаграционный взрыв в данной методике моделируется расширяющейся во времени сферой, скорость расширения которой соответствует выделяющимся в процессе взрывного горения продуктам взрыва.

Приведенные на рисунке 2 динамические параметры взрывного давления получены при следующих исходных данных: максимальный радиус огненного шара не превысит $R_{SF} = 110$ м (максимальный диаметр $D_{SF} = 220$ м), максимальное значение видимой скорости пламени не превысит значения $W = 166.75$ м/с.

Указанные начальные параметры огненного шара получены исходя из приведенного

ранее энергетического потенциала аварийного выброса горючих веществ на установке $E = 2.9 \cdot 10^9$ кДж. Максимальная удельная энергия взрыва стехиометрической пропиленовоздушной смеси составляет [8] $Q_V = 3839$ кДж/м³. Тогда максимальный радиус взрывоопасной смеси составит 54.5 м. При взрывном сгорании смесь расширяется в максимум в $\varepsilon = 8.28$ раза [9]. Поэтому максимальный радиус огненного шара не превысит $R_{SF} = 110$ м.

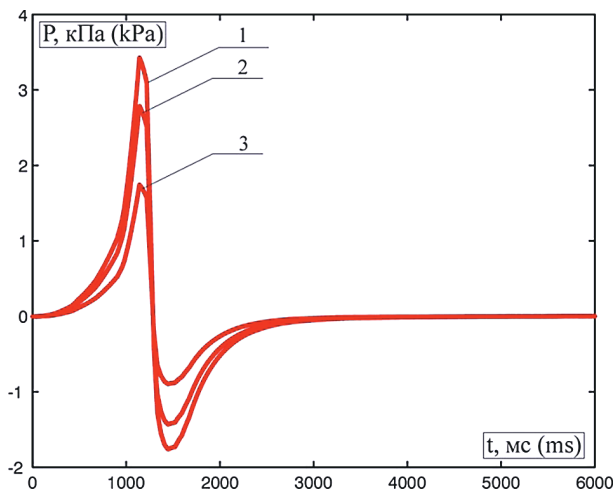


Рис. 2. Динамические параметры взрывного давления на расстояниях: 1 – 800.40 м; 2 – 984.40 м; 3 – 1574.40 м от установки при дефлаграционном аварийном взрыве

Fig. 2. Dynamic parameters of the explosive pressure at the distances: 1 – 800.40 m; 2 – 984.40 m and 3 – 1574.40 m from the installation at the deflagration emergency explosion

Для оценки максимального значения видимой скорости пламени использовались эмпирические и аналитические соотношения [1-9]. При проведении расчетов динамической нагрузки было выбрано максимальное значение видимой скорости пламени $W = 166.75$ м/с.

На рисунке 3 приведены кинематические характеристики фронта пламени и интегральные параметры газодинамических потоков, сопровождающих рассматриваемый взрыв. Для данной кинематики фронта пламени был проведен расчет, результаты которого были отражены на рисунке 2.

Расчеты показали, что максимальное значение давления в проходящей волне сжатия на расстоянии 800.40 м не превысит значения $P_{MAX} = 3.43$ кПа, импульс фазы сжатия составит не более $I = 1092$ Па·с, время фазы сжатия, приведенной к треугольному импульсу, составит $T = 637$ мс (где $T = \frac{2 \cdot I}{P_{MAX}}$), вероятности средних

и сильных разрушений типовых строительных конструкций (и гибели человека) будут равны нулю. Условные вероятности предполагаемых событий определялись по соответствующей методике [1, 15].

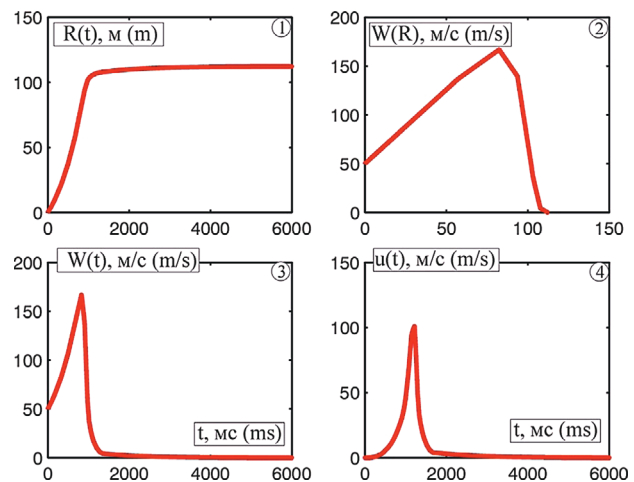


Рис. 3. Кинематические параметры фронта пламени:

- 1 – зависимость положения фронта пламени от времени;
- 2 – зависимость скорости фронта пламени от пройденного расстояния;
- 3 – зависимость скорости фронта пламени от времени;
- 4 – скорость потока через поверхность, ограничивающую огненный шар

Fig. 3. Kinematic parameters of the flame front:

- 1 – dependence of the position of the flame front on time;
- 2 – dependence of the speed of the flame front on the distance traveled;
- 3 – dependence of the speed of the flame front on time;
- 4 – flow rate through the surface limiting the fireball

На рисунке 4 приведены спектры волнового возмущения на расстоянии 800.40 м от установки.

Спектр является одной из характеристик динамической нагрузки. Он характеризует распределение нагрузки (давления) по частотам и определяет вибрационные свойства нагружения конструкции. Например, ухо человека, являясь в определенном смысле естественным датчиком давления, воспринимает нестационарные возмущения (давление ВУВ или волны сжатия при дефлаграционных взрывах) только в определенном диапазоне частот: примерно от 10 до 20000 Гц. Указанный диапазон частот (слышимый диапазон частот) подразделяется на стандартные полосы частот – октавы. Граничные частоты стандартных акустических (воспринимаемых человеком)

октав имеют следующие значения: 45, 90, 180, 355, 710, 1400, 2800, 5600, 11200 и 22400 Гц. Для инфразвуковых частот, которые не воспринимаются человеком, будем использовать следующие значения их границ: 1, 22.5 Гц. Среднегеометрические частоты стандартных октав равны: 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 и 16000 Гц [10], а среднегеометрические частоты инфразвуковых полос – 5 и 32 Гц.

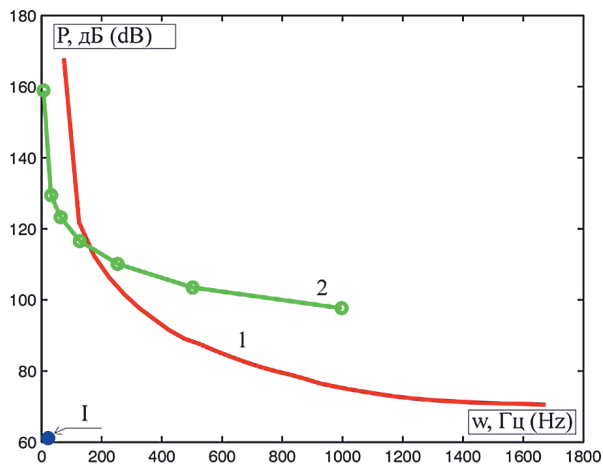


Рис. 4. Спектральные характеристики волнового возмущения на расстоянии 800.40 м от установки:

- 1 – узкополосный спектр (ширина полосы – 50 Гц);
- 2 – спектр в стандартных октавах;
- I – частота границы звукового диапазона

Fig. 4. Spectral characteristics of the wave disturbance at the distance 800.40 m from the installation:

- 1 – narrow-band spectrum (bandwidth 50 Hz);
- 2 – spectrum in standard octaves.
- I – the frequency of the sound range boundary

В связи с широким диапазоном изменения воспринимаемой человеком динамической нагрузки была введена логарифмическая шкала измерений. Интенсивность волн измеряют в децибелах (дБ): $L = 20 \cdot \log \frac{P}{P_A}$, где P_A – пороговое значение звукового давления, равное $2 \cdot 10^{-5}$ Па.

На рисунке 4 представлены спектр приведенного на рисунке 2(1) волнового возмущения в узкой полосе частот (ширина полосы – 50 Гц) и спектр в октавных полосах частот. Напомним, что узкополосные спектры, приведенные, например, в полосе частот 50 Гц, следует трактовать следующим образом: каждая точка графика указывает значение (дБ) уровня колебательного процесса на частотах плюс-минус 25 Гц от частоты рассматриваемой точки.

Расчеты показали, что интенсивность взрывной нагрузки в звуковой области (частота

колебаний выше 22.5 Гц) составит 135.0 дБ, а общая интенсивность колебаний – 167.9 дБ. Другими словами, вся волновая энергия будет сосредоточена в инфразвуковой области частот, то есть ухо человека ее воспринимать не будет, а строительные конструкции будут воспринимать данную нестационарную нагрузку в виде статической.

Из приведенных спектров волнового возмущения следует, что основная часть волновой энергии сосредоточена на низких (дозвуковых) частотах. Длины волн на низких частотах существенно превышают размеры типовых зданий или соизмеримы с ними: например, длина волны на частоте 1 Гц составляет 340 м, на частоте 10 Гц – 34 м и т.д.

Характер взаимодействия волны с препятствием зависит от соотношения между длиной волны и характерным размером препятствия. При длинных волнах (по сравнению с характерным размером препятствия) волна практически не искажается на препятствии, то есть как бы «не замечает» его. Короткие волны практически полностью отражаются от препятствия, то есть их амплитуда возрастает в два раза, но не более (для линейных или слабых волн). Поэтому подобные волновые нагрузки практически не искажаются (не усиливаются или не ослабевают) на зданиях и сооружениях. Здания фактически «погружаются» в волну сжатия.

На рисунке 5 приведен фрагмент узкополосного спектра волновой нагрузки (ширина полосы – 0.167 Гц) в области низких частот. На рисунке 6 приведена приблизительная зависимость от частоты возмущения коэффициента отражения (усиления) волны от фасада типового здания, имеющего характерный размер в плане 20 м, – $K_r(w)$.

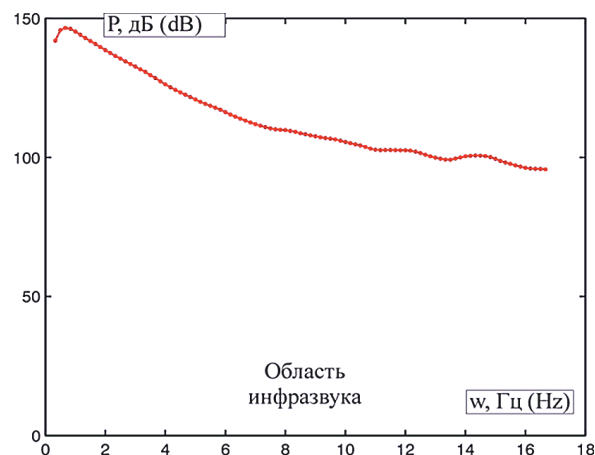


Рис. 5. Низкочастотная область узкополосного спектра волнового возмущения на расстоянии 800.40 м от установки (ширина полосы – 0.167 Гц)

Fig. 5. Low-frequency region of the narrow-band spectrum of wave disturbance at a distance of 800.40 m from the installation (bandwidth 0.167 Hz)

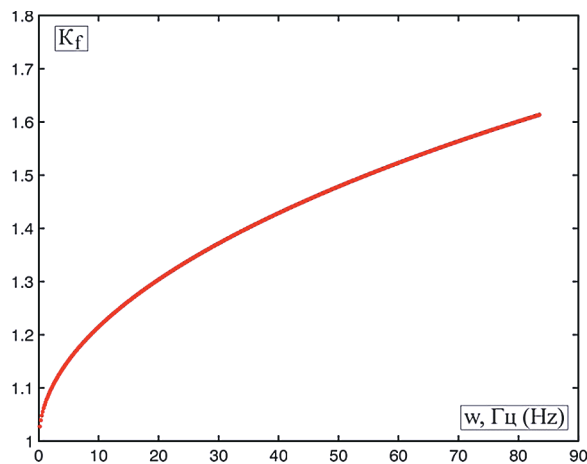


Рис. 6. Коэффициент отражения $K_r(w)$ волнового возмущения от фасада типового здания, имеющего характерный размер в плане 20 м

Fig. 6. Coefficient of reflection $K_r(w)$ of wave disturbance from the façade of the typical building having a specific size in the plan 20 m

Из приведенных графиков следует, что основная волновая энергия сконцентрирована на частотах, которые ниже 10 Гц. Напомним, что разность между уровнями на 20 дБ соответствует различию в давлениях в 10 раз, разность в 40 дБ говорит о том, что давления отличаются в 100 раз, и т.д.

График для коэффициентов отражения (усиления) волны, приведенный на рисунке 6, показывает, что на указанных частотах происходит незначительное усиление волны: от 1 до 1.20. Исходя из этого, можно утверждать, что взрывная нагрузка с обозначенными ранее параметрами практически не изменится при взаимодействии с фасадами типовых зданий. Данный вывод подтверждает рисунок 7, где приведены временные зависимости проходящей взрывной нагрузки вблизи здания и средней (по пространству фасада) нагрузки, действующей на фасад здания.

Из рисунка следует, что наличие здания, имеющего характерный размер в плане 20 м, приводит к усилению взрывной волны не более чем на 8.2%. Интегральный коэффициент усиления взрывной волны на фасаде здания составляет: $K_r = 1.082$. При этом максимальное давление взрывной нагрузки составит не более 3.70 кПа при давлении в проходящей взрывной волне 3.43 кПа.

Рассмотрим вопрос приведения динамической взрывной нагрузки к эквивалентной статической.

При расчетах последствий динамического воздействия на строительные конструкции в настоящее время используется следующая приближенная методология. Динамическая

нагрузка заменяется эквивалентной ей по действию статической нагрузкой, которая определяется по формуле [11-14]:

$$P_э = P_{\text{макс}} \cdot K_{\text{д}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{макс}}$ – максимальное значение динамической нагрузки; $K_{\text{д}}$ – коэффициент динамичности, равный максимальному значению функции динамичности $T(t)$, описывающей движение (перемещение сечений) конструкции во времени.

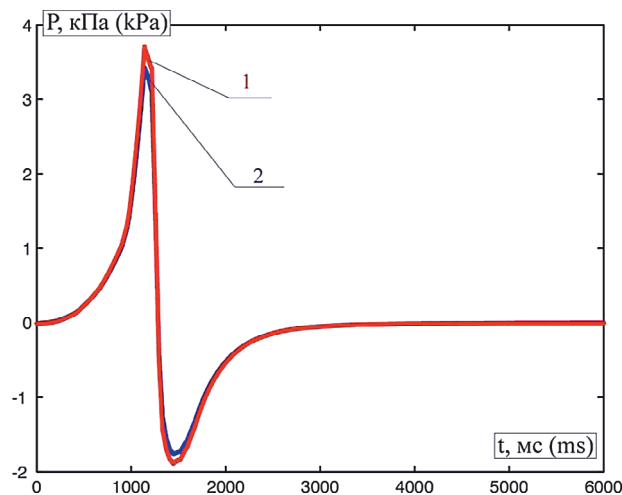


Рис. 7. Динамические параметры взрывной волны на расстоянии 800.40 м от установки:

- 1 – волны на фасаде здания, имеющего характерный размер в плане 20 м;
2 – проходящей взрывной волны

Fig. 7. Dynamic parameters of the explosive wave at a distance of 800.40 m from the installation:

- 1 – waves on the facade of the building, which has a characteristic size in the plan of 20 m;
2 – passing explosive wave

Как следует из (1), для замены динамической нагрузки эквивалентной ей статической необходимо определить коэффициент динамичности $K_{\text{д}}$.

Известно, что движение конструкции в стадии упругих деформаций описывается уравнением [11-14]:

$$\frac{d^2 T}{dt^2} + \omega^2 \cdot T = \omega^2 \cdot f(t), \quad (2)$$

где ω – круговая частота собственных колебаний конструкции; $f(t)$ – функция, описывающая изменение безразмерной $f(t) = \frac{P(t)}{P_{\text{макс}}}$

динамической нагрузки во времени; $T(t) = S(t) / S_{\text{макс}}$ – относительное перемещение конструкции, или функция динамичности; $S_{\text{макс}}$ – смещение конструкции при статическом воздействии на нее нагрузки $P_{\text{макс}}$.

Численное интегрирование выражения (2) дает функцию перемещения

конструкции под действием силы $f(t)$ во времени. Максимальное значение функции перемещения $T(t)$ есть коэффициент динамичности K_d .

Физический смысл функции динамичности заключается в том, что она в безразмерном виде (давление нормируется к максимальному давлению $P_{МАКС}$, смещение конструкции нормируется к $S_{МАКС}$, где $S_{МАКС}$ – смещение конструкции при статическом воздействии на нее нагрузки $P_{МАКС}$, а время нормируется к периоду собственных колебаний конструкции T_0) описывает перемещение центральной точки конструкции при воздействии на нее динамической нагрузки.

Проведем расчет функций динамичности и коэффициентов динамичности для формы нагрузки, приведенной на рисунке 7, которая наиболее точно соответствует форме нагрузки, формирующейся при дефлаграционном взрыве на рассматриваемой установке. В качестве периода собственных колебаний конструкции принято значение $T_0 = 100$ мс, что соответствует частоте собственных колебаний конструкции $w_0 = 10$ Гц.

На рисунке 8 приведены результаты расчета функции динамичности для принятого периода собственных колебаний $T_0 = 100$ мс (частота собственных колебаний конструкции $w_0 = 10$ Гц).

Максимальное значение функции динамичности, или коэффициент динамичности для периода собственных колебаний $T_0 = 100$ мс, составил: $K_d = 1.073$. Минимальное значение

коэффициента динамичности (колебательное движение системы в обратном направлении действию силы) составило:

$$K_{d-} = -0.698.$$

Таким образом, динамическая нагрузка, действующая на фасад здания, расположенного на расстоянии 800.40 м от установки, при аварийном взрыве на данной установке будет эквивалентна статической нагрузке, численное значение которой составит не более $K_d \cdot 3.70$ кПа = 3.97 кПа. При расчетах предполагалось, что характерный линейный размер фасада здания составляет 20 м, а частота собственных колебаний конструкции равна $w_0 = 10$ Гц.

Приведенные результаты расчетов подтверждают мысль о том, что при дефлаграционных взрывах, которые характеризуются плавным нарастанием давления, коэффициенты динамичности близки к единице, то есть процесс нагружения конструкции происходит в квазистационарном режиме.

Аналогичные расчеты были проведены для нагрузки, имеющей крутой передний фронт, что характерно для детонационных взрывов.

На рисунке 9 приведены результаты расчета функции динамичности при воздействии на здание с периодом собственных колебаний $T_0 = 100$ мс (частота собственных колебаний конструкции $w_0 = 10$ Гц) давления

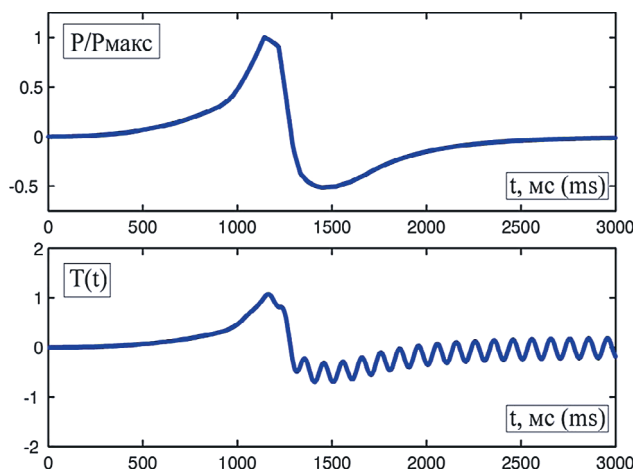


Рис. 8. Временная зависимость динамической нагрузки, действующей на конструкцию при дефлаграционном взрыве, и функция динамичности $T_0 = 100$ мс; $w_0 = 10$ Гц

Fig. 8. Time dependence of the dynamic load acting on the structure during a deflagration explosion, and the dynamism function $T_0 = 100$ ms; $w_0 = 10$ Hz

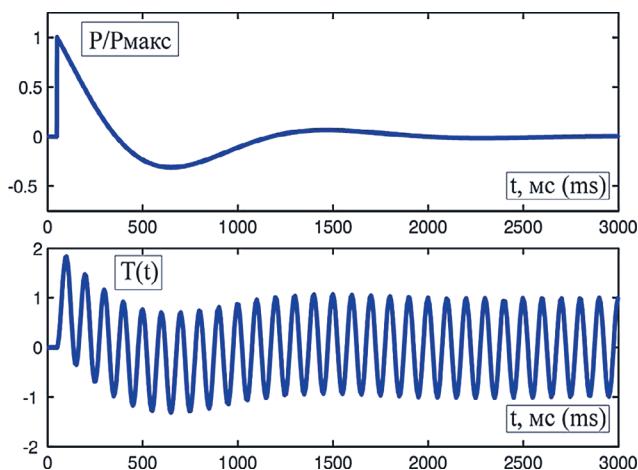


Рис. 9. Временная зависимость динамической нагрузки, действующей на конструкцию при детонационном взрыве, и функция динамичности $T_0 = 100$ мс; $w_0 = 10$ Гц

Fig. 9. Time dependence of the dynamic load acting on the structure during a detonation explosion, and the dynamism function $T_0 = 100$ ms; $w_0 = 10$ Hz

от воздушной ударной волны (ВУВ), формирующейся при детонационном взрыве на установке. Параметры детонационной волны приведены на рисунке 1.

Расчеты показали, что коэффициент динамичности в этом случае составит $K_d = 1.823$, то есть приближается к двойке, а минимальное значение коэффициента динамичности может составить: $K_d = -1.316$. Это предполагает значительное смещение конструкции (в стадии упругих деформаций) в направлении, противоположном действию ВУВ.

Библиографический список

1. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах: приказ МЧС РФ от 10 июля 2009 г. № 404, с изм. и доп. – М., 2017. – URL: <https://base.garant.ru/196118/>
2. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей: Сборник документов Госгортехнадзора России, НТЦ «Промышленная безопасность». – Серия 27. – Вып. 2. – М.: ГУП «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2001. – 224 с.
3. **Комаров А.А.** Прогнозирование нагрузок от аварийных дефлаграционных взрывов и оценка последствий их воздействия на здания и сооружения: Дис. ... д-ра техн. наук. – М.: МГСУ, 2001. – 460 с.
4. **Komarov A.A., Phan T.A.** Parameter calculation of accident explosions at outdoor installations of power-intensive facilities IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 365(2018). – 042041. doi: 10.1088/1757-899X/365/4/042041.
5. **Komarov A.A., Gromov N.V.** Experimental observation of visible flame propagation rate in accidental deflagration explosions and explosive load reduction // MATEC Web of Conferences. – 251. – 02024 (2018). VI International Scientific Conference «Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education» (IPICSE-2018). doi.org/10.1051/mateconf/201825102024.
6. **Бажина Е.В., Комаров А.А.** Определение параметров динамических нагрузок от аварийных взрывов, действующих на здания и сооружения взрывоопасных производств // Вестник МГСУ. – 2013. – № 12. – С. 14-19.
7. **Комаров А.А.** Основы обеспечения взрывобезопасности объектов и прилегающих к ним территорий: Учебное пособие. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2015. – 91 с.
8. **Бирбраер А.Н., Роleder А.Ю.** Экстремальные воздействия на сооружения. – СПб.:

Выводы

Максимальная динамическая нагрузка, действующая на фасад здания, расположенного на расстоянии 800.40 м от рассматриваемой установки, при аварийном взрыве на данной установке будет эквивалентна статической нагрузке, численное значение которой составит не более 4.00 кПа при условии, что характерный линейный размер фасада здания составляет 20 м при частоте собственных колебаний конструкции $w_0 = 10$ Гц (период собственных колебаний $T_0 = 100$ мс).

References

1. Prikaz MCHS RF ot 10 iulya 2009 g. N404 «Ob utverzhdanii metodiki opredeleniya raschetnyh velichin pozharnogo riska na proizvodstvennyh objektah» (s izmeneniyami i dopolneniyami) – М.: 2017. <https://base.garant.ru/196118/>
2. Metodika otsenki posledstvij varijnyh vzryvov toplivno-vozdushnyh smesey. Sb. dokumentov Gosgortehnadzor Rossii, NTTTS «Promyshlennaya bezopasnost», seriya 27, vyp. 2. – М.: GUP «Nauchno-tehnicheskij tsentr po bezopasnosti v promyshlennosti Gosgortehnadzora Rossii», 2001. – 224 s.
3. **Komarov A.A.** Prognozirovanie nagruzok ot avarijnyh deflagratsionnyh vzryvov i otsenka posledstvij ih vozdeystvij na zdaniya i sooruzheniya. Dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni doktora tehniceskikh nauk. – М.: MGSU. 2001. – 460 s.
4. **Komarov A.A., Phan T.A.** Parameter calculation of accident explosions at outdoor installations of power-intensive facilities IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 365 (2018) 042041 doi: 10.1088/1757-899X/365/4/042041
5. **Komarov A.A., Gromov N.V.** Experimental observation of visible flame propagation rate in accidental deflagration explosions and explosive load reduction // MATEC Web of Conferences 251, 02024 (2018). VI International Scientific Conference «Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education» (IPICSE-2018) doi.org/10.1051/mateconf/201825102024
6. **Bazhina E.V., Komarov A.A.** Opredelenie parametrov dinamicheskikh ngruzok on avarijnyh vzryvov, dejstvuyushchih na zdaniya i sooruzheniya vzryvoopasyh proizvodstv // Vestnik MGSU. – 2013. – № 12. – S. 14-19.
7. **Komarov A.A.** Osnovy obespecheniya vzryvobezopasnosti objektov i prilegayushchih k nim territorij: uchebnoe posobie. – М.: Akademiya GPS MCHS Rossii, 2015. – 91 s.
8. **Birbraer A.N., Roleder A.Yu.** Extremalnye vozdeystviya na sooruzheniya. – Spb: izd-vo Politehn. un-ta, 2009. – 594 s.

Изд-во Политехнического университета, 2009. – 594 с.

9. Хуснутдинов Д.З. и др. Аварийные взрывы газозвоздушных смесей в атмосфере. – М.: НИУ МГСУ, 2014. – 80 с.

10. Авиационная акустика / Под ред. А.Г. Мунина. – М.: Машиностроение, 1973. – 448 с.

11. Попов Н.Н., Расторгуев Б.С. Динамический расчет железобетонных конструкций. – М.: Стройиздат, 1974. – 219 с.

12. Расторгуев Б.С. Методические указания по проектированию новых и обследованию существующих строительных конструкций зданий взрывоопасных производств. – М., 1996. – 227 с.

13. СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. – М.: Стандартинформ, 2018. – 125 с.

14. Справочник проектировщика. Динамический расчет сооружений на специальные воздействия. – М.: Стройиздат, 1981. – 248 с.

15. ГОСТ Р 12.3.047-2012 ССБТ. Пожарная безопасность технологических процессов. – М.: Стандартинформ, 2014. – 85 с.

16. Абросимов А.А., Комаров А.А. Мероприятия, обеспечивающие безопасные нагрузки при аварийных взрывах в зданиях со взрывоопасными технологиями // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2002. – № 4. – С. 48-51.

17. Абросимов А.А., Комаров А.А. Механизмы формирования взрывных нагрузок на территории нефтеперерабатывающих комплексов // Нефть, газ и бизнес. – 2002. – № 6 (50). – С. 58-61.

18. Полетаев Н.Л. Эмпирическая оценка турбулентной скорости выгорания // Пожаровзрывобезопасность. – 1998. – № 1. – С. 19-23.

19. Мишуев А.А., Комаров А.А. Научные основы обеспечения устойчивости зданий при внутренних аварийных взрывах // Безопасность жизнедеятельности. – 2001. – № 1. – С. 18-23.

20. Шлег А.М. Определение параметров легкобрасываемых конструкций: Дис. ... канд. техн. наук. – М.: МГСУ, 2002. – 201 с.

Критерии авторства

Комаров А.А., Бажина Е.В. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Комаров А.А., Бажина Е.В. имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов

Статья поступила в редакцию: 25.12.2021 г.

Одобрена после рецензирования 21.02.2022 г.

Принята к публикации 09.02.2022 г.

9. Khusnutdinov D.Z. i dr. Avarijnye vzryvy gazovozdushnyh smesej v atmosfere. – M.: NIU MGSU, 2014. – 80 s.

10. Aviatcionnaya akustika. Pod redaktsiej Munina A.G. – M.: Mashinostroenie, 1973. – 448 s.

11. Popov N.N., Rastorguev B.S. Dinamicheskiy raschet zhzhelzebetonnyh konstruksij. – M.: Strojizdat, 1974. – 219 s.

12. Rastorguev B.S. Metodicheskie ukazaniya po proektirovaniyu novyh i obsledovaniyu sushchestvuyushchih stroitelnyh konstruksij zdaniy vzryvoopasyh proizvodstv (1 red.). – M.: 1996. – 227 s.

13. SP 20.13330.2011 Nagruzki i vozdeystviya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 2.01.07-85*. – M.: Standartinform, 2018. – 125 s.

14. Spravochnik proektirovshchika. Dinamicheskiy raschet sooruzhenij na spetsialnye vozdeystviya. – M.: Strojizdat, 1981. – 248 s.

15. GOST R12.3.047-2012 SSBT "Pozharnay bezopasnost tehnologicheskikh protsessov". – M.: Standartinform, 2014. – 85 s.

16. Abrosimov A.A., Komarov A.A. Meropriyatiya, obespechivayushchie bezopasnye nagruzki pri avarijnyh vzryvah v zdaniyah so mi tehnologiyami // Sejsmostojkoe stroitelstvo. Bezopasnost sooruzhenij. – 2002. – № 4. – S. 48-51.

17. Abrosimov A.A., Komarov A.A. Mehanizmy formirovaniya vzryvnyh nagruzok na territorii neftepererabatyvayushchih kompleksov // Neft, gaz i biznes. – 2002. – № 6 (50). – S. 58-61.

18. Poletaev N.L. Empiricheskaya otsenka turbulentnoj skorosti vygoraniya // Pozharovzryvobezopasnost. – 1998. – № 1. – S. 19-23.

19. Mishuev A.A., Komarov A.A. Nauchnye osnovy obespecheniya ustojchivosti zdaniy pri vnutrennih avarijnyh vzryvah. // Bezopasnost zhiznedeyatelnosti. – 2001. – № 1. – S. 18-23.

20. Shleg A.M. Opredelenie parametrov legkosbrasyvaemyh konstruksij. Dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehnicheskikh nauk. – M.: MGSU, 2002. – 201 s.

Criteria of authorship

Komarov A.A., Bazhina E.V. carried out theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. Komarov A.A., Bazhina E.V. have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Conflict of interests

The authors state that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 25.12.2021

Approved after reviewing 21.02.2022

Accepted for publication 09.02.2022