

Основные методы оценки параметров ударных волн при аварийных взрывах. Принципы проектирования взрывоустойчивых зданий и сооружений



Е.Е. Невская,
науч. сотрудник,
e.nevskaya@safety.ru

АНО «Агентство исследований промышленных рисков», Москва, Россия

Представлен анализ основных параметров нагрузок, вызванных действием ударной волны вследствие взрывов. Проанализированы подходы, используемые для их вычисления. Рассмотрены основные методы расчета конструкций и их элементов на воздействие аварийных взрывов в целях установления приемлемого уровня угроз, благодаря которому меры по смягчению последствий взрыва и защите зданий должны быть реализованы. Предложены принципы проектирования взрывоустойчивых зданий и сооружений на опасных производствах.

Ключевые слова: взрыв, детонация, взрывные нагрузки, топливно-воздушная смесь, избыточное давление взрыва, численные методы, пределы деформации, фиброармированные полимерные материалы.
DOI: 10.24000/0409-2961-2017-9-20-29

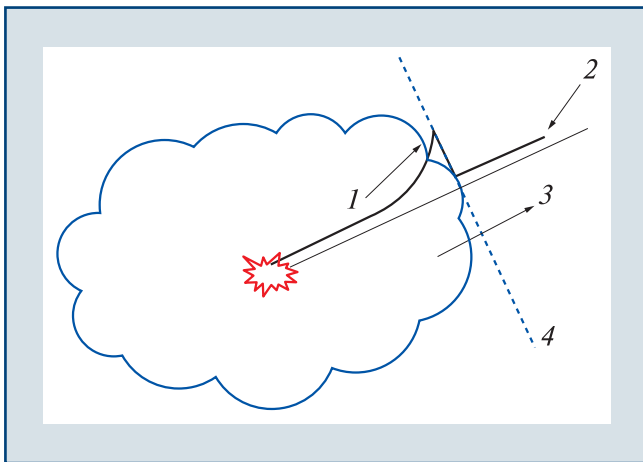
Введение

Стратегия борьбы со взрывами и реализация мер по смягчению последствий взрыва требуют внимания и решения начиная с этапов планирования и проектирования опасного производственного объекта (ОПО), поскольку впоследствии, при эксплуатации, решение данных задач становится либо более трудным, либо невозможным. В настоящий момент существуют два пути уменьшения последствий воздействия взрыва: разработка взрывоустойчивой конструкции зданий и сооружений на вновь проектируемых или реконструируемых объектах; создание универсального защитного устройства, способного эффективно снизить интенсивность падающей ударной волны (УВ) и удовлетворить требованиям по его размещению в условиях существующей плотной застройки на опасных объектах. В обоих случаях для разработки конструкции, устойчивой к взрывам, изначально необходимо определить величину взрывной нагрузки, приходящейся на нее.

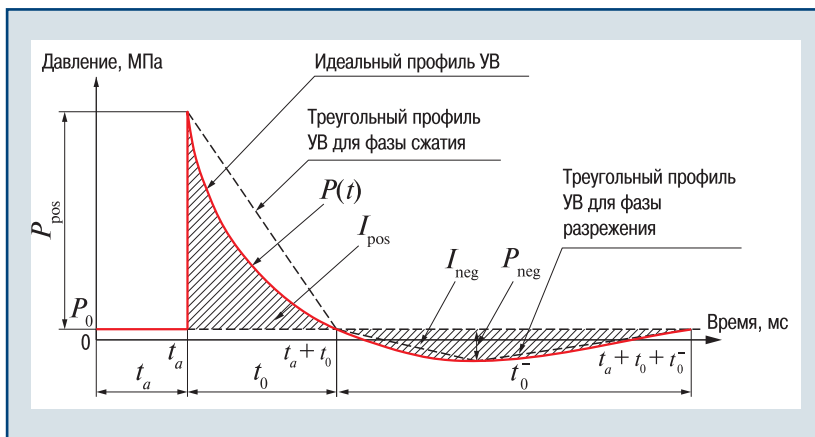
Оценка параметров УВ

Для определения взрывной нагрузки, приходящейся на здания и сооружения, проводят анализ зависимости импульса от избыточного давления в процессах дефлаграционного горения в открытом пространстве и помещениях, физического и химического (детонация) взрывов путем построения диаграмм «избыточное давление — импульс» (P-I)-диаграммы). В зависимости от источников энергии рассматривают физические и химические взрывы. Источником энергии физических взрывов служит энергия сжатой газовой фазы. При химиче-

ском взрыве происходит высвобождение тепловой энергии в результате химических реакций (взрывы горючих веществ, газовые или пылевые взрывы). Самые опасные последствия взрывов связаны с образованием динамического импульса в виде УВ. Скачок уплотнения или УВ — это распространяющаяся со сверхзвуковой скоростью узкая переходная область, в которой происходит резкое увеличение плотности, давления и скорости. Детонация — наиболее опасный вид взрывного превращения. Детонационная волна распространяется по невозмущенной среде со сверхзвуковой скоростью, приводя к локальному повышению давления в зоне химического превращения исходного вещества в конечные продукты. В результате детонации образуется ограниченная область продуктов детонации, имеющих высокие давление и температуру, резкое расширение этой области приводит к образованию УВ в воздухе (или грунте) и взаимодействию их с какими-либо препятствиями. По окончании процесса детонации (рис. 1, здесь 1, 2 — давление соответственно избыточное и атмосферное; 3 — распространение УВ; 4 — ударный фронт) распространяется УВ, скорость которой больше звуковой. На рис. 2 (здесь P_0 — атмосферное давление, кПа; P_{pos} — амплитуда фазы сжатия, кПа; t_a — время прихода ударного фронта, с; $P(t)$ — кривая изменения давления; I_{pos} — импульс фазы сжатия, кПа·с; t_0 — продолжительность фазы сжатия, с; I_{neg} — импульс фазы разрежения, кПа·с; P_{neg} — амплитуда фазы разрежения, кПа; t_0 — продолжительность фазы разрежения, с) показан типичный профиль УВ, характерный для случая идеальной детонации.



▲ Рис. 1. Схема распределения давления по взрывной волне
▲ Fig. 1. Diagram of pressure distribution along the blast wave



▲ Рис. 2. Характерный профиль УВ
▲ Fig. 2. Blast wave typical profile

Положительная фаза волны давления, известная как фаза сжатия, характеризуется амплитудой избыточного давления, импульсом фазы сжатия и длительностью положительной фазы; отрицательная фаза или фаза разрежения — длительностью, импульсом и амплитудой фазы разрежения. Часто в анализе используют треугольный профиль нагрузки взрыва, как показано пунктиром на рис. 1, пренебрегая отрицательной фазой. Большинство эмпирических подходов к вычислению и определению профиля избыточного давления УВ взрыва были предложены и широко исследовались с середины XX в. (М.А. Садовский, 1941 г.; Н.Л. Brode, 1955 г.; J. Henrych, 1979 г.; W. Baker, 1983 г.; M. Held, 1983 г.; Ч. Кингери и Дж. Балмэш, 1984 г.; Дж. Кинни и Ч. Грахам, 1985 г.; М.М. Ismail и S.G. Murray, 1993 г.; P.D. Smith и J.G. Hetherington, 1994 г.; T. Krauthammer и A. Altenberg, 2000 г.; Б.Е. Гельфанд, В.И. Сидоров, А.С. Печёркин, М.В. Лисанов, С.И. Сумской, В.Ф. Мартынюк, А.А. Агапов, 2001 г.; N. Lam и P. Mendis, 2004 г.; М.У.Н. Bangash и Т. Bangash, 2006 г.; З. Баджич, 2007 г.; J. Borgers и J. Vantomme, 2008 г.; M. Teich и N. Gebbeken, 2010 г.). В зарубеж-

ной практике уравнение Фридлендера наиболее часто используется для описания профиля взрывной волны из-за его простоты в сравнении с другими эмпирическими соотношениями. Исходное уравнение Фридлендера не зависит от атмосферного давления. Однако модифицированное уравнение Фридлендера с учетом P_0 широко используется для моделирования УВ, будучи сравнительно более точным и достаточно простым:

$$P(t) = P_0 + P_{\text{pos}}(1 - t/t_0)e^{-b \frac{t}{t_0}}, \quad (1)$$

$$0 < t \leq t_0;$$

$$b = 2,3 \frac{t_0}{t} \log\left(\frac{P_{\text{pos}}}{P}\right), \quad (2)$$

где t — время, прошедшее с момента наступления взрыва, мс; b — параметр, описывающий спад кривой (декремент затухания).

Импульс положительной фазы сжатия вычисляется по выражению

$$I_{\text{pos}} = \int_{t_a}^{t_a+t_0} P(t) dt. \quad (3)$$

Аналитическое решение представлено в виде формулы:

$$I_{\text{pos}} = \frac{P_{\text{pos}} t_0}{b^2} (b - 1 + e^{-b}). \quad (4)$$

Кроме того, формула (4) служит альтернативным решением в определении b в том случае, если параметры P_{pos} , I_{pos} , t_0 известны из экспериментальных данных.

Другой общепринятый подход к получению значения давления взрыва заключается в задании взрывного воздействия на элемент конструкции в виде функции давления, которая также зависит от времени. Данный подход основан на эмпирической модели Ч. Кингери и Дж. Балмэша [1]. Пиковое давление вычисляют с помощью уравнения, реализованного в подходе CONWER [2].

При встрече УВ с жесткой преградой происходит ее отражение, и навстречу падающей волне начинает распространяться волна отражения. Давление, ощущаемое поверхностью, представляет совокупный эффект падающей волны и отраженной:

$$\Delta P = P_r \cos^2 \alpha + P_i (1 + \cos^2 \alpha - 2 \cos \alpha), \quad (5)$$

где P_r и P_i — давление соответственно отраженное и падающее, кПа; α — угол падения ударного фронта на поверхность.

Кроме того, давление на преграду увеличивается более чем вдвое, так как помимо давления сжатого в волне воздуха на нее воздействует заторможенный

поток воздуха за фронтом, создающий добавочный скоростной напор. Давление от падающей и отраженной волн рассчитывают отдельно. Согласно [2] значение падающей на поверхность УВ можно найти исходя из модифицированного уравнения Фридлендера (1), пиковое отраженное давление определяют следующим образом:

$$P_r = 2P_{\text{pos}} \left(\frac{7P_0 + 4P_{\text{pos}}}{7P_0 + P_{\text{pos}}} \right). \quad (6)$$

Формула (3) справедлива, если α , угол между направлением движения и поверхностью, на которой происходит скачок уплотнения, меньше 90° , т.е. $\cos\alpha \geq 0$. Если $\cos\alpha < 0$, то формула (5) приобретает вид:

$$\Delta P = P_r. \quad (7)$$

Подход CONWER реализован в программном комплексе по моделированию взрывных нагрузок LS-DYNA, который встроен в пакеты программ ANSYS и MD NASTRAN, также он поддерживается программой MEDINA. Применение заданных функций, представленных в подходе, позволяет описать пиковое давление и импульс, приходящие на конструкцию, с приемлемой точностью. Ограничение данного подхода — он не принимает во внимание эффект «затухания» УВ из-за наличия объектов, находящихся на пути ее распространения, и локальные эффекты ее отражения от элементов конструкции. Геометрические характеристики окружающего пространства учитываются в методике [3], степень загроможденности пространства определяет скорость взрывного превращения облака топливно-воздушной смеси (ТВС).

Согласно [4] избыточное давление детонационной волны определяется как разность между абсолютным давлением на фронте детонационной волны и атмосферным давлением. После того как детонационная волна достигла границы облака, в окружающем его воздухе распространяется УВ. Ее параметры зависят от расстояния, давление уменьшается по мере удаления от места взрыва. Для воздушной УВ значение избыточного давления определяется на основании массы заряда в эквиваленте тринитротолуола (тротил), имеющего молекулярную формулу $C_7H_5(NO_2)_3$, расстояния до заряда и ориентации взрывного элемента в пространстве.

Для вычисления параметров воздушной УВ на заданном расстоянии от центра облака при взрыве ТВС с учетом количественного значения массы тротила обычно предварительно рассчитывают соответствующее приведенное расстояние:

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}}, \quad (8)$$

где R — расстояние от центра облака до рассматриваемой точки, м; W — количественное значение массы тротила, кг.

В основе такого моделирования параметров УВ лежит принцип «кубического корня» Хопкинсона: «Подобные ударные волны образуются на тождественно равных приведенных расстояниях в тех случаях, когда два заряда одного и того же вещества подобной геометрии, но различного размера детонируют в одинаковой атмосфере» [5].

Уравнение, предложенное Дж. Кинни и К. Грахамом, отражает зависимость избыточного давления, бар, от Z при реализации сценария химического взрыва и может быть записано в следующем виде:

$$\frac{P_{\text{pos}}}{P_0} = \frac{808 \left[1 + \left(\frac{Z}{4,5} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0,048} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0,32} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{1,35} \right)^2}}. \quad (9)$$

В отечественных подходах в области промышленной безопасности при исследовании взрывов облаков ТВС специалисты также применяли понятие тротилового эквивалента по энергии, считая, что эти взрывы аналогичны взрывам твердых (конденсированных) взрывчатых веществ (ВВ) [6]. Методики, основанные на тротиловом эквиваленте, включают уравнение М.А. Садовского [7] для избыточного давления, МПа, при оценке последствий детонационных взрывов облаков ТВС

$$P_{\text{pos}} = 0,085 \frac{\sqrt[3]{W}}{R} + 0,3 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R^2} \right)^2 + 0,8 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R^2} \right)^3. \quad (10)$$

Основываясь на проведенном эксперименте, З. Баджич в работе [8] модифицировал уравнение М.А. Садовского и представил новое соотношение для вычисления пикового избыточного давления, бар:

$$P_{\text{pos}} = 1,02 \frac{\sqrt[3]{W}}{R} + 4,36 \frac{\sqrt[3]{W^2}}{R^2} + 14 \frac{W}{R^3}. \quad (11)$$

Однако модели взрыва облака ТВС, основанные на тротиловом эквиваленте, не способны правильно описать явления, происходящие в ближней зоне объемного взрыва ТВС. Это объясняется тем, что начальные условия формирования УВ при взрыве парового облака по значению давления и геометрическим размерам резко отличны от таковых при взрыве конденсированных ВВ [9]. В непосредственной близости от места взрыва конденсированного ВВ давление может превысить 1 ГПа, в то время как максимальное избыточное давление в результа-

те детонационного взрыва ТВС в ближней зоне не превышает 2 МПа [10]. Время передачи энергии в УВ при детонации ТВС существенно больше. Более того, при газовой детонации доля выделившейся энергии, передающейся в УВ, существенно меньше доли энергии, передающейся в УВ при детонации конденсированного ВВ. По-иному идет и диссипация энергии в воздушных УВ: при взрыве конденсированных ВВ она более интенсивна в силу большей интенсивности волны.

Таким образом, методики, основанные на тротиловом эквиваленте, могут использоваться в качестве консервативной оценки, необходимой для экспресс-анализа устойчивости объектов при условии их расположения в средней и дальней зонах от источника взрыва.

В такой ситуации примерно 40 лет назад начали отказываться от метода тротилового эквивалента при оценке действия газовых взрывов. Появились методики, учитывающие указанные выше специфические особенности газовых взрывов как в ближней, так и в дальней зонах. К ним относится методика [3]. Представленный в ней метод расчета позволяет учитывать агрегатное состояние и энергетические характеристики ТВС, связывая последствия взрыва газопарового облака с конкретным потенциально опасным веществом. Параметры ударной волны можно рассчитать для индивидуального горючего газа, смеси газов и гетерогенной системы. Также данная методика учитывает размеры облака, возможный дрейф и положение облака относительно земли.

Методики численного моделирования для определения избыточного давления на фронте УВ

Методики, упомянутые выше и применяемые для оценки воздействия УВ на объекты, в основном разработаны по результатам натурных экспериментальных исследований. Эти методики описывают, как правило, взрывы сферических облаков на открытом пространстве.

С их помощью можно рассчитать поля давлений и импульсов при взрывах, определить радиусы зон и степень возможных разрушений, а также частоту воздействия падающей УВ на здание, сооружение [11, 12]. Однако они позволяют приблизительно определить возникающие разрушения и не учитывают реальную застройку ОПО, рельеф, реальную форму облака и переменную концентрацию в нем опасного вещества, местоположение источника воспламенения. В настоящее время наиболее адекватно оценить параметры взрывной нагрузки позволяют средства численного моделирования с использованием математических моделей, описывающих распространение продуктов взрыва и УВ в трехмерном пространстве.

Методы, наиболее точно оценивающие последствия аварийного взрыва, используют подход вычислительной гидродинамики (англ. Computational

Fluid Dynamics — CFD) для расчета нагрузки взрыва в определенных точках конструкции. Программное обеспечение, основанное на подходе CFD, учитывает пространственные изменения нагрузки, геометрию застройки, форму облака ТВС и расстояние между источником взрыва и конструкцией. В работе [13] проведено сравнение расчетов по российским нормативным методикам, входящим в компьютерный комплекс ТОХИ+, и зарубежным методикам, используемым в программах PHAST и FLACS, для типовых сценариев аварий с выбросом горючих жидкостей, сжиженных углеводородов и токсичных веществ. Показано, что методики, основанные на тротиловом эквиваленте для оценки последствий взрыва ТВС, дают наиболее консервативные расстояния зон разрушения (без учета дрейфа облака ТВС). Такие расстояния в зависимости от условий могут отличаться (от 2 до 10 раз) от расстояний, рассчитанных по методикам РД 03-409—01 или РД-03-26—2007 (ТОХИ+), BST (PHAST) и вычислительной гидродинамики комплекса FLACS (CFD).

Методы, доступные для прогнозирования эффектов взрыва, можно сгруппировать по трем основным категориям: эмпирические (или аналитические), полуэмпирические и численные (первого порядка). Эмпирические подходы разрабатываются на основе обширного анализа огромного объема экспериментальных данных, собранных в течение длительного периода времени. Таким образом, они ограничены объемом экспериментальной базы данных. Кроме того, хорошо известно, что эмпирические уравнения не дают точных результатов при рассмотрении ближайшей от источника взрыва зоны действия УВ. Полуэмпирические подходы основаны на упрощенных моделях физики явлений. В них основное внимание уделяется моделированию физических процессов в значительно упрощенном виде. Этот подход в основном зависит от обширных данных и тематических исследований, а точность, как правило, выше, чем та, которая обеспечивается эмпирическим подходом. Численный метод (первого порядка) включает совокупность физических, математических и численных методов, предназначенных для вычисления характеристик потоковых процессов. В этих методах математические функции описывают законы сохранения массы, импульса и энергии. Динамическое поведение материалов при этом выражено эмпирическими зависимостями, полученными на основе экспериментов, проведенных на этих материалах. Под эту категорию попадают методы: конечных элементов (англ. Finite Element Method), конечных разностей (англ. Finite-difference Method) и граничных элементов (англ. Boundary Element Method).

Оценка проявления устойчивости строений по отношению к взрыву

Для детонационного взрыва характерны возможность возникновения значительного давления на

фронте УВ и кратковременность действия (десятые и даже сотые доли секунды). На установках ОПО, где есть возможность возникновения детонационного взрыва, большинство строительных конструкций рассчитаны на нагрузку от действия УВ, т.е. за пределами облака. Если же конструкция находится внутри него, то на нее действует давление детонационной волны, которое настолько велико, что обычные сооружения выдержать его не могут. Избыточное давление при дефлаграционном взрыве изменяется иначе, чем при детонации: нарастание происходит медленнее и максимальное значение становится меньше, но длительность — больше. Поэтому такое нагружение по характеру ближе к статическому [4].

Конструкции объектов, подвергающихся действию взрывных нагрузок, рассчитывают: на основное сочетание нагрузок в соответствии с требованиями норм [14]; на особое сочетание нагрузок: статических (постоянных и длительных) и динамических, вызванных взрывными волнами.

В особом сочетании не учитывают кратковременные нагрузки, установленные в нормах [14]. Длительная снеговая нагрузка принимается во внимание, если она создает неблагоприятную комбинацию усилий. Коэффициенты надежности по нагрузке для всех учитываемых нагрузок принимают равными единице. Динамическая нагрузка считается нормально приложенной к поверхности конструкции и равномерно распределенной по ее грузовой площади.

Расчет конструкций на действие взрывных волн проводят методами динамики сооружений, в которых существуют три основных направления [15]: численные методы высокой точности с использованием диаграмм деформирования материалов « σ - ε », реализованные в программных комплексах; приближенные динамические методы, позволяющие в результате решения обыкновенных дифференциальных уравнений получать аналитические расчетные зависимости; упрощенные методы расчета, основанные на применении эквивалентных статических нагрузок, получаемых в результате обобщения данных динамических расчетов.

К численным относятся сложные методы анализа систем со многими степенями свободы, которые позволяют оценить реакцию элементов конструкций или сложных систем. В отличие от аналитических методов, на основе которых можно рассчитать только конечное состояние конструкции, численные методы позволяют получить динамику изменения состояния конструкций во времени, необходимую для расчетов по предельным состояниям.

Преимущество приближенного решения — оно позволяет установить влияние увеличения или уменьшения значений любых параметров нагрузки на напряжения и деформации в конструкции при помощи графических построений. Часто для полу-

чения решения требуется численное интегрирование уравнений.

К упрощенным относятся методы приведения конструкций к системам с одной и двумя степенями свободы, используемые для описания динамического поведения элементов конструкций. Результаты расчетов могут быть представлены графически: на диаграммах подобия или в аналитической форме. Упрощенные методы основаны на инженерных приближениях и схематизации конструктивных элементов объектов.

На основе результатов экспериментального и численного анализа должны быть приняты меры по проектированию взрывоустойчивых конструкций, соответствующие отечественным нормам и подтверждающие устойчивость таких конструкций к рассмотренным угрозам. Таким образом, анализ дает уверенность в том, что сооружение сможет противостоять взрыву с заданными параметрами.

Критерии реакции конструкции

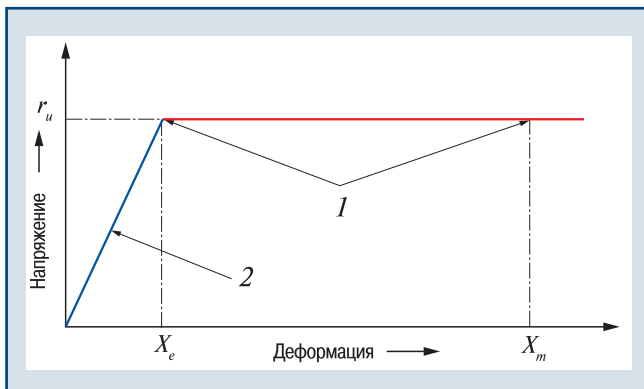
Как упоминалось выше, основной вид внешнего воздействия на конструкцию — нагрузка. При статическом нагружении конструкция деформируется и находится в состоянии равновесия, которое характеризуется внутренними усилиями и перемещениями. Напряженно-деформированное состояние конструкции рассматривается как физический процесс. Рост нагрузки на конструкцию возможен до тех пор, пока не достигнет значения, отвечающего предельному состоянию конструкции по прочности. Такое значение нагрузки называется несущей способностью конструкции.

В динамически нагруженных конструкциях материал находится, как правило, в сложном напряженно-деформированном состоянии, изменяющемся во времени. Проявляющиеся при этом свойства могут существенно отличаться от статического поведения — при низких скоростях деформации. Сложности при анализе результатов динамических экспериментов возникают в связи с волновыми процессами в образцах, когда инерционные силы накладываются на внутренние усилия, характеризующие свойства материала [6].

В случае нагрузки от взрыва максимальная динамическая реакция ограничивается для того, чтобы предотвратить разрушение составляющих частей конструкции и выдержать взрывные нагрузки посредством указания критерия смещения, который косвенно учитывает приемлемый уровень ущерба. В отечественном пособии [16] есть указания по исключению возможности разрушения основных несущих и ограждающих конструкций во взрывоустойчивых зданиях. Допускаются случайные повреждения конструкций, не влияющие на их прочность, устойчивость и некоторые эксплуатационные характеристики, а также требующие незначительных материальных затрат на проведение ремонтных работ.

Также указания по исключению возможности разрушения основных несущих конструкций представлены и в документе Комитета по вопросам взрывоустойчивого проектирования нефтехимических объектов ASCE [17]. Эксплуатационные характеристики сооружений на ОПО, помимо функциональности, должны включать возможность их дальнейшего использования после взрыва. Как указано в [17], основные критерии реакции конструкционного элемента на динамическое воздействие: коэффициент пластичности μ и угол поворота θ прогибающейся от нагрузки балки (плиты или панели). Коэффициент пластичности μ определяют как отношение максимального отклонения деформированного элемента X_m к эквивалентному упругому отклонению X_e по формуле (9). Коэффициент пластичности μ связан с пластической деформацией. Предполагается, что конструкция разрушается, когда значение пластической деформации приближается к значению деформации разрушения материала. Зависимость между напряжениями и деформациями материала при нагружении представлена на рис. 3 (здесь 1, 2 — участки деформаций соответственно упругопластических и упругих; r_u — предельное значение сопротивления). Коэффициент пластичности μ определяют следующим образом:

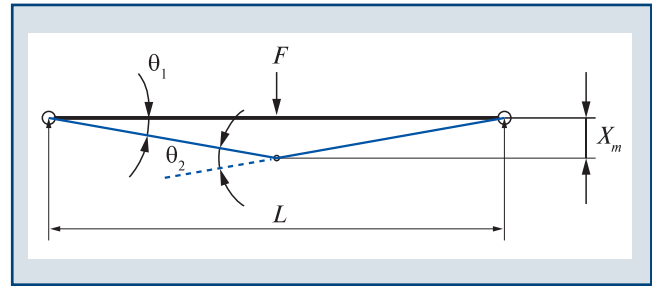
$$\mu = X_m / X_e \quad (12)$$



▲ Рис. 3. Диаграмма напряженно-деформированного состояния элемента
▲ Fig. 3. Diagram of the element strain-stress state

Угол поворота θ прогибающейся от нагрузки балки — еще один критерий реакции элемента, который соотносит максимальный прогиб с расстоянием между пролетами конструкции и устанавливает степень нестабильности для критических участков элемента. Угол поворота θ определяют несколькими способами (рис. 4, здесь F — приложенная сила, Н; L — длина балки, мм). Первый способ заключается в нахождении угла θ_1 , сформированного между линией, соединяющей конечные точки балки или опоры, и линией, соединяющей конечную точку прогиба и ближайшую конечную точку балки

$$\theta_1 = \arctg(2X_m/L). \quad (13)$$

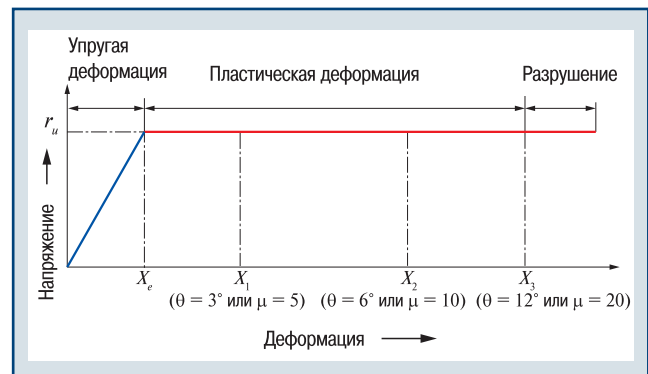


▲ Рис. 4. Определение θ
▲ Fig. 4. Identification of θ

Второй способ — по прилежащему углу θ_2 , сформированному между двумя линиями, отходящими от точки максимального отклонения балки

$$\theta_2 = 2\theta_1. \quad (14)$$

В качестве примера рассмотрим диаграмму напряженно-деформированного состояния стальной пластины с предельными значениями критериев реакции на динамическое воздействие (рис. 5). Диапазоны критериев представлены для трех уровней разрушения, которые имеют общий характер как для стальных компонентов конструкции, так и для компонентов из железобетона. Область $[X_e, X_1]$ соответствует низкому уровню разрушений, устойчивое повреждение компонента отсутствует или едва заметно. В области $[X_1, X_2]$ компонент подвергается устойчивой деформации, возникают так называемые средние повреждения. В области с высоким уровнем разрушений $[X_2, X_3]$ компонент претерпевает значительную деформацию, после которой восстановление практически невозможно. Затем следует область разрушений, при которой компонент полностью утрачивает структурную целостность.



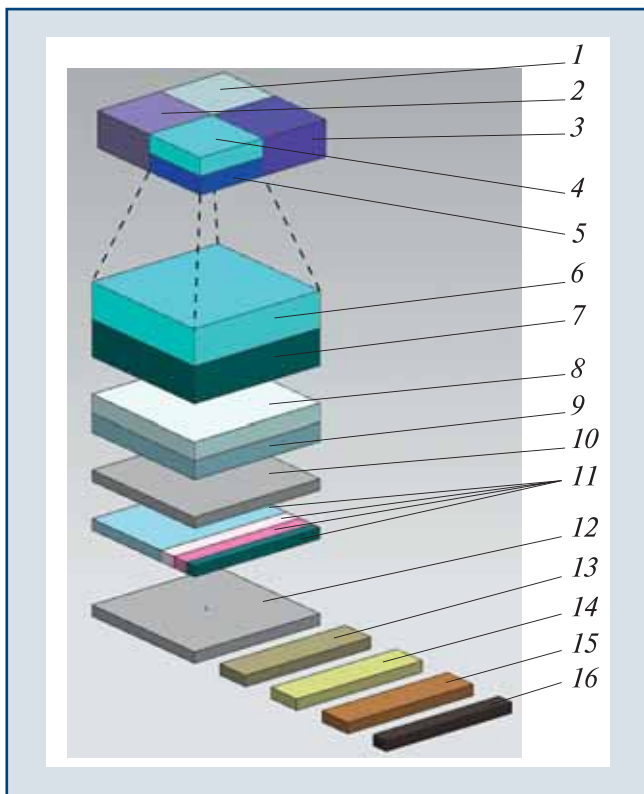
▲ Рис. 5. Диаграмма напряженно-деформированного состояния стальной пластины
▲ Fig. 5. Diagram of steel plate strain-stress state

Предельные значения параметров деформации для стальных и железобетонных компонентов указаны в приложении 5.В [17]. Прогнозируемую реакцию элемента необходимо сравнить с μ и θ , чтобы убедиться, что ни одно из этих значений не превышено.

Таким образом, значения μ и θ для разных материалов используют в качестве критериев реакции при проектировании взрывозащищенных конструкций.

Основные принципы проектирования взрывоустойчивых конструкций

В целях проектирования взрывоустойчивых конструкций рассматривают различные виды нагрузок и их сочетания (рис. 6, здесь 1 — собственный вес конструкций; 2 — рабочий вес оборудования; 3 — рабочий вес трубопроводов; 4 — собственный вес оборудования, незаполненной рабочей средой; 5 — собственный вес трубопроводов, незаполненных рабочей средой; 6 — вес и давление грунтов; 7 — гидростатическое давление; 8 — переменные статические нагрузки; 9 — нагрузки при техническом обслуживании; 10 — нагрузки при взрыве; 11 — климатические нагрузки (снеговые, ветровые, температурные, гололедные); 12 — вибрационная нагрузка; 13 — сейсмическая нагрузка; 14 — нагрузки при неравномерной осадке; 15 — строительные нагрузки; 16 — нагрузки при транспортировании или подвижные нагрузки). К основным принципам данного проектирования относят:



▲ Рис. 6. Нагрузки на конструкции и сооружения ОПО и их сочетания

▲ Fig. 6. Loads on structures and HPF facilities and their combinations

недопущение разрушения конструкций при взрывах, определяемых как возможные при количественной оценке рисков;

обеспечение защиты персонала в зданиях с постоянным пребыванием людей (операторные);

срабатывание системы противоаварийной защиты в безопасных условиях на установках, расположенных рядом с установкой, на которой произошел взрыв;

обеспечение перезапуска установок, расположенных рядом с установкой, на которой произошел взрыв, если при этом практически не пострадали несущие конструкции.

Следовательно, если на технологической установке произойдет взрыв:

не должна разрушиться несущая, т.е. основная конструкция. Согласно руководству [17] несущая конструкция должна проектироваться таким образом, чтобы на ней возникали только средние разрушения, т.е. разрушения обшивки модулей и второстепенных конструкций;

для блока или модуля, на котором произошел внутренний взрыв, допускаются значительные повреждения;

не должны разрушиться модули (эстакады или здания) на технологических установках, расположенных рядом с данной установкой, а несущая конструкция должна оставаться в области упругой деформации материала. Если для того, чтобы несущая конструкция оставалась в области упругой деформации, потребуются более тяжелые конструкции, чем при проектировании конструкции без обеспечения взрывоустойчивости, то, в зависимости от обстоятельств и при согласовании с владельцем ОПО, могут допускаться пластические деформации при условии, что они обеспечивают меньшие разрушения, согласно определению в руководстве [17].

Для проектирования взрывоустойчивой конструкции необходимы хорошие проектные и строительные навыки, а также знание характеристик УВ и поведения конструкций и их элементов при взрывных нагрузках. После определения условия нагрузки и выбора места расположения инженер-проектировщик участвует в выборе необходимого типа конструкции, способного выдержать потенциальное взрывное воздействие. Хотя все виды конструкций обеспечивают определенное сопротивление взрыву, существуют более подходящие конструкции по сравнению с другими [18].

Наиболее важная особенность взрывоустойчивой конструкции — способность поглощать энергию взрыва, не вызывая общее катастрофическое разрушение. Строительные материалы во взрывозащищенных конструкциях должны быть достаточно гибкими и прочными. Кроме того, при взрыве на ОПО вследствие взрывной нагрузки на одной стороне здание будет подвергаться воздействию поперечной силы, внутреннему усилию, возникающему в конструкции в ответ на действие внешней нагрузки. Чтобы конструкция могла показать максимальный уровень взрывоустойчивости, ее рама и

фундамент должны выдерживать большую поперечную нагрузку. Это требование аналогично требованиям для сейсмостойчивой конструкции. В целом ряд сейсмостойчивых конструкций в некоторой степени являются взрывостойчивыми. Составные части взрывостойчивой конструкции должны иметь соответствующий потенциал деформации для формирования механизма гибкости.

Железобетон обычно считается наиболее подходящим и экономичным строительным материалом для взрывостойчивых конструкций, особенно для объектов, расположенных вблизи потенциального источника взрыва, где конструкции будут подвергаться относительно высокому избыточному давлению и термическим эффектам при взрыве. Однако это не означает, что нельзя проектировать здания с металлическим каркасом или со стеновым заполнением из листового металла, главное требование — чтобы они располагались на соответствующем расстоянии от источников опасности.

Для взрывостойчивых конструкций хрупкие материалы (неармированный бетон, кирпич, древесина) не подходят. Кроме того, что они уязвимы к катастрофическим внезапным разрушениям при взрывной нагрузке, такие материалы после взрыва разрушаются на множество осколков и обломков, которые могут привести к повреждению оборудования и серьезным травмам персонала. Древесина и изделия из дерева, используемые для промышленных зданий, могут стать источником пожароопасности. Основным критерий для оценки такой конструкции — характер разрушения при больших нагрузках. В целом хрупкий материал следует применять только во внешней оболочке взрывостойчивой конструкции при соответствующем армировании в целях обеспечения пластичности и пластичного каркаса для поперечного сопротивления конструкции при взрывной нагрузке.

Фиброармированные полимерные композиты в настоящее время широко используются за рубежом в качестве усиления конструкций вместо железобетонных плит, так как они более прочны, устойчивы к коррозии и гораздо более удобны при транспортировании, применении и установке. Самое большое преимущество таких композитов — их способность принимать заданные свойства. Они легко подстраиваются под специфические условия среды, в отличие от других материалов, например стали, характеризуются низкой ползучестью, легкостью, высоким пределом прочности на растяжение (в 10 раз выше, чем у стали) и, таким образом, оптимальны в применении. Процедура упрочнения с помощью фиброармированных полимерных композитов не требует много времени, ее технология проста, а сам материал делает здание более взрывостойчивым. В основном в их состав входят композитные материалы на основе углеродного, арамидного, базальтового волокна, а также стекловолокна. Очевидно, расходы

на них по сравнению с другими материалами — препятствие в принятии решения по внедрению данной технологии взрывозащиты. Однако непосредственное сравнение цен за единицу (элемент) продукции может быть неправильным. Если учитывать установку и логистику, то стоимость данных композиций может коррелировать со стоимостью обычных материалов [19].

Заключение

Воздействия на сооружения, вызванные взрывными нагрузками, возникают сравнительно редко, однако учитывать их необходимо, поскольку многие из них могут быть причиной разрушения или повреждения зданий и сооружений, влиять на сохранность оборудования и угрожать здоровью и даже жизни людей. Проектирование взрывостойчивых конструкций зданий и усиление существующих — меры, которые владелец ОПО должен принимать в целях минимизации риска гибели людей, а также риска разрушения оборудования и технологических линий из-за угрозы случайных взрывов облаков ТВС. Начальный этап взрывостойчивого проектирования — определение параметров взрывной нагрузки. Цели оценки нагрузки: установление и достижение приемлемого уровня угроз, для обеспечения которого должны быть реализованы меры по смягчению последствий взрыва и защите зданий.

Важная задача — сохранение конструкции здания путем исключения возможности прогрессирующего обрушения. Этого можно добиться, следуя основным рекомендациям по проектированию взрывостойчивых конструкций: расчет и анализ ключевых структурных элементов, без которых здание не способно противостоять сильной нагрузке от высокого давления; создание альтернативных путей действия нагрузки, чтобы при потере одного структурного компонента здание устояло; использование связующих компонентов на основе полимерных композитов в целях укрепления конструкции для поддержания стабильности, гибкости и структурной прочности. Принимая во внимание вышеуказанные параметры, могут быть выбраны подходящие материалы и соответствующие стратегии проектирования, которые позволят уменьшить последствия взрыва.

Список литературы

1. Kingery C.N., Bulmash G. Airblast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst. Report ARBL-TR-02555. U.S. Army BRL. — Aberdeen Proving Ground, 1984.
2. Airblast loading model for DYNA 2D and DYNA 3D by Glenn Randers-Pehrson and Kenneth A. Bannister. CONWEP 2.0. URL: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a322344.pdf> (дата обращения: 25.07.2017).
3. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей: рук. по безопасности: при-

каз Ростехнадзора от 31 марта 2016 г. № 137. — Сер. 27. — Вып. 15. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2016. — 44 с.

4. *Бирбраер А.Н., Роleder А.Ю.* Экстремальные воздействия на сооружения. — СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. — 594 с.

5. *Мартынюк В.Ф.* Лекции по теории горения и взрыва: учеб. пособие. — М.: Изд. центр РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2014. — 184 с.

6. *Рашитов Р.Ф.* Обеспечение защищенности обслуживающего персонала установок нефтеперерабатывающих предприятий от воздействия ударной волны: дис. ... канд. техн. наук. — Уфа, 2008. — 150 с.

7. *Садовский М.А.* Механическое действие воздушных ударных волн по данным экспериментальных исследований// Физика взрыва. — М.: АН СССР, 1952. — № 1. — С. 20–110.

8. *Vajić Z.* Determination of TNT equivalent for various 15. Explosives. — Belgrade: University of Belgrade, 2007.

9. *Расчет зон разрушения зданий и сооружений при взрывах топливно-воздушных смесей на опасных производственных объектах/ К.В. Ефремов, М.В. Лисанов, А.С. Софьин и др.*// Безопасность труда в промышленности. — 2011. — № 9. — С. 70–77.

10. *Козлитин А.М., Попов А.И., Козлитин П.А.* Теоретические основы и практика анализа техногенных рисков. Вероятностные методы количественной оценки опасностей техносферы. — Саратов: СГТУ, 2002. — 178 с.

11. *Методы обоснования взрывоустойчивости зданий и сооружений при взрывах топливно-воздушных смесей на опасных производственных объектах: рук. по безопасности: приказ Ростехнадзора от 13 мая 2015 г. № 189.* — Сер. 27. — Вып. 17. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2016. — 78 с.

12. *Количественный анализ риска при обосновании взрывоустойчивости зданий и сооружений/ Д.В. Дегтярев, М.В. Лисанов, С.И. Сумской, А.А. Швыряев*// Безопасность труда в промышленности. — 2013. — № 6. — С. 82–89.

13. *Сравнительный анализ российских и зарубежных методик и компьютерных программ по моделированию аварийных выбросов и оценке риска/ Е.А. Агапова, Д.В. Дегтярев, М.В. Лисанов и др.*// Безопасность труда в промышленности. — 2015. — № 9. — С. 71–78.

14. *СНиП 20.13330.2011 (СНиП 2.01.07–85*).* Нагрузки и воздействия. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200084848> (дата обращения: 29.07.2017).

15. *Расторгуев Б.С., Плотников А.И., Хуснутдинов Д.З.* Проектирование зданий и сооружений при аварийных взрывных воздействиях. — М.: Изд-во АСВ, 2007. — 152 с.

16. *Пособие по обследованию и проектированию зданий и сооружений, подверженных воздействию взрывных нагрузок.* URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200069775> (дата обращения: 30.07.2017).

17. *American Society of Civil Engineers* «Design of blast resistant buildings in petrochemical facilities». — New York, 2010. — 318 p.

18. *Невская Е.Е., Глебова Е.В.* Анализ способов и средств повышения уровня защиты зданий и сооружений от действия ударных волн// Безопасность труда в промышленности. — 2017. — № 2. — С. 73–78.

19. *Uddin N.* Blast Protection of Civil Infrastructures and Vehicles Using Composites. — New York, 2010. — 488 p.

e.nevskaya@safety.ru

Материал поступил в редакцию 24 августа 2017 г.

«Bezopasnost Truda v Promyshlennosti»/ «Occupational Safety in Industry», 2017, № 9, pp. 20–29.
DOI: 10.24000/0409-2961-2017-9-20-29

Main Methods of the Blast Waves Parameters Assessment at Emergency Explosions. Principles of Designing Blast Resistant Buildings and Structures

Information about the Author

E.E. Nevskaya, Research Associate, e.nevskaya@safety.ru
Autonomous Noncommercial Organization «Industrial Risk Research Agency», Moscow, Russia

Abstract

The problem of buildings and structures blast resistance shall be resolved starting from planning and design stages of hazardous production facility. When designing the structure, which is resistant to explosions, it is first required to determine the value of the blast load falling on it. Majority of approaches to calculation and identification of the excessive pressure profile of the blast wave are based on the empirical equations of Sadvovsky, Friedlander, Kinney and Graham. According to the practice of calculations it was established that the methods based on TNT equivalent can be used as an express analysis of the facilities resistance provided that they are located in the middle and far zones. Widely distributed in the Russian Federation were the methods given in the Safety Guide «Methods for assessment of the consequences of accidental explosions of fuel and air mixtures», which allow to consider the aggregate state and energy characteristics of fuel and air mixture associating the consequences of the steam-and-gas cloud explosion with the specific potentially hazardous substance. In the methods that assess more precisely the consequences of accidental explosion the computational fluid dynamics approach is used to calculate the time intervals for the blast load at the certain points of structure. The instrument for assessment of the manifestation of buildings resistance in relation to explosion is the calculations of object structures for the main and special combination of loads. The calculation of structures for blast waves effect shall be carried out using methods of structural dynamics, in which there are three main directions: numerical methods of high accuracy, approximate dynamic methods and simplified methods of calculation. Main measured reaction criteria are the coefficient of ductility and the angle of turn bending due to the beams load. The calculated values of the deformation parameters must be compared with their limit values to make sure that none of these values is exceeded. An important task in building structure preservation is to prevent progressive collapse. Such a reduction can be achieved by following the basic recommendations on designing of blast resistant structures, which are presented in the article.

Key words: explosion, detonation, blast loads, fuel and air mixture, blast overpressure, numerical methods, deformation limits, fibro-reinforced polymeric materials.

References

1. Kingery C.N., Bulmash G. Airblast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst. Report ARBL-TR-02555. U.S. Army BRL. Aberdeen Proving Ground, 1984.
2. Airblast loading model for DYNA 2D and DYNA 3D by Glenn Randers-Pehrson and Kenneth A. Bannister. CONWEP 2.0. Available at: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a322344.pdf> (accessed: July 25, 2017).
3. *Metodika otsenki posledstviy avariynykh vzryvov toplivno-vozdushnykh smesey: ruk. po bezopasnosti: prikaz Rostekhnadzora ot 31 marta 2016 g. № 137* (Methods for assessment of the consequences of accidental explosions of fuel and air mixtures: Safety Guide: order of Rostekhnadzor of March 31, 2016 № 137). Ser. 27. Iss. 15. Moscow: ZAO NTC PB, 2016. 44 p.
4. *Birbrayer A.N., Roleder A.Yu. Ekstremalnye vozdeystviya na sooruzheniya* (Extreme Effects on Structures). Saint-Petersburg: Izd-vo Politekh. un-ta, 2009. 594 p.
5. *Martynuk V.F. Lektsii po teorii goreniya i vzryva: ucheb. posobie* (Lectures on the Theory of Combustion and Explosion: Textbook). Moscow: Izd. tsentr RGU нефти i gaza im. I.M. Gubkina, 2014. 184 p.
6. *Rashitov R.F. Obespechenie zashchishchennosti obsluzhivayushchego personala ustanovok neftepererabatyvayushchikh predpriyatiy ot vozdeystviya udarnoy volny: dis. ... kand. tekhn. nauk* (Ensuring Protection of the Maintenance Staff of the Units at Oil Processing Enterprises from the Blast Wave Effect: ... Candidate of Technical Sciences). Ufa, 2008. 150 p.
7. *Sadvovsky M.A. Mechanical effect of air blast waves from experimental results. Fizika vzryva = Physics of Explosion.* Moscow: AN SSSR, 1952. № 1. pp. 20–110.

8. Bajić Z. Determination of TNT equivalent for various 15. Explosives. Belgrade: University of Belgrade, 2007.

9. Efremov K.V., Lisanov M.V., Sofyin A.S., Samuseva E.A., Sumskey S.I., Kiriyenko A.P. Calculation of buildings and structures destruction at explosions of fuel and air mixtures at hazardous production facilities. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2011. № 9. pp. 70–77.

10. Kozlitin A.M., Popov A.I., Kozlitin P.A. *Teoreticheskie osnovy i praktika analiza tekhnogennykh riskov. Veroyatnostnye metody kolichestvennoy otsenki opasnostey tekhnosfery* (Theoretical Bases and Practice of the Analysis of Technogenic risks. Probabilistic Methods of Quantitative Assessment of Technosphere Hazards). Saratov: SGTU, 2002. 178 p.

11. *Metody obosnovaniya vzryvoustoychivosti zdaniy i sooruzheniy pri vzryvakh toplivno-vozdushnykh smesey na opasnykh proizvodstvennykh obektakh: ruk. po bezopasnosti: prikaz Rostekhnadzora ot 13 maya 2015 g. № 189* (Methods of justification of buildings and structures blast resistance at explosions of fuel and air mixtures at hazardous production facilities: Safety Guide: order of Rostekhnadzora of May 13, 2015 № 189). Ser. 27. Iss. 17. Moscow: ZAO NTC PB, 2016. 78 p.

12. Degtyarev D.V., Lisanov M.V., Sumskey S.I., Shvyryaev A.A. Quantitative risk analysis at justification of buildings and structures blast resistance. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2013. № 6. pp. 82–89.

13. Agapova E.A., Degtyarev D.V., Lisanov M.V., Kryukov A.S., Kulberg S.B., Sumskey S.I. Comparative analysis of the Russian and foreign methods and computer programs for modeling of emergency emissions and risk assessment. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2015. № 9. pp. 71–78.

14. *SNiP 20.13330.2011 (SNiP 2.01.07–85*)*. *Nagruzki i vozdeystviya* (SNiP 20.13330.2011 (SNiP 20.01.07–85*)). Loads and effects). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200084848> (accessed: July 29, 2017).

15. Rastorguev B.S., Plotnikov A.I., Khusnutdinov D.Z. *Proektirovanie zdaniy i sooruzheniy pri avariynnykh vzryvnykh vozdeystviyakh* (Design of Buildings and Structures at Emergency Blast Effects). Moscow: Izd-vo ASV, 2007. 152 p.

16. *Posobie po obsledovaniyu i proektirovaniyu zdaniy i sooruzheniy, podverzhennykh vozdeystviyu vzryvnykh nagruzok* (Guidelines on Inspection and Design of Buildings and Structures Subjected to Blast Loads Effect). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200069775> (accessed: July 30, 2017).

17. American Society of Civil Engineers «Design of blast resistant buildings in petrochemical facilities». New York, 2010. 318 p.

18. Nevskaya E.E., Glebova E.V. Analysis of ways and means of increase in level of buildings and structures protection from blast waves effect. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2017. № 2. pp. 73–78.

19. Uddin N. Blast Protection of Civil Infrastructures and Vehicles Using Composites. New York, 2010. 488 p.

ГОТОВИТСЯ К ИЗДАНИЮ

ПЕРЕЧЕНЬ НОРМАТИВНЫХ ПРАВОВЫХ АКТОВ И НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ, ОТНОСЯЩИХСЯ К СФЕРЕ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ФЕДЕРАЛЬНОЙ СЛУЖБЫ ПО ЭКОЛОГИЧЕСКОМУ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ И АТОМНОМУ НАДЗОРУ. РАЗДЕЛ I «ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ, СТРОИТЕЛЬНЫЙ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ НАДЗОР» П-01-01—2017



Перечень нормативных правовых актов и нормативных документов, относящихся к сфере деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (раздел I «Технологический, строительный, энергетический надзор») (П-01-01—2017), утвержденный приказом Ростехнадзора от 10.07.2017 № 254, является документом информационно-справочного характера и подготовлен Ростехнадзором и ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности» (ЗАО НТЦ ПБ) взамен предыдущего Перечня (П-01-01—2015), утвержденного приказом Ростехнадзора от 13.01.2015 № 5.

В подготовке П-01-01—2017 принимали участие С.Г. Радионова, А.Л. Рыбас, В.В. Василина, Ю.В. Минченко, Т.Н. Чернякова, А.П. Филатов, Г.М. Селезнев, М.А. Климова, Д.И. Фролов, Д.А. Яковлев, А.Ю. Шарапо, И.В. Соколова, Г.П. Ермак, С.А. Жулина (Ростехнадзор), В.И. Сидоров, А.С. Печеркин, Е.В. Кловач, И.А. Кручинина, С.Н. Буйновский, В.К. Шалаев (ЗАО НТЦ ПБ).

В П-01-01—2017 содержатся сведения об основных законодательных и иных нормативных правовых актах и нормативных документах федеральных органов исполнительной власти в области технологического, строительного и энергетического надзора по состоянию на 06.07.2017.

В связи с продолжающимися изменениями нормативной базы рекомендуется сверять сведения о документах, указанных в П-01-01—2017, со сведениями, размещаемыми на официальных сайтах Президента Российской Федерации, Правительства Российской Федерации и федеральных органов исполнительной власти, в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», на Официальном интернет-портале правовой информации www.pravo.gov.ru, а также в журнале «Безопасность труда в промышленности» и Информационном бюллетене Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору.

В настоящее издание включена Информация издателя к П-01-01—2017, не являющаяся частью этого перечня и содержащая дополнительные сведения о документах, относящихся к сфере деятельности Ростехнадзора, по состоянию на день подготовки издания.

ЭТУ КНИГУ И ДРУГИЕ НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ МОЖНО ПРИОБРЕСТИ ПО АДРЕСУ:

Москва, Переведеновский пер., д. 13, стр. 14, а также заказать в отделе распространения по тел/факсам: +7 (495) 620-4753 (многоканальный), 620-4747, 620-4746. E-mail: ornd@safety.ru.