

УДК 699.85

## О ПОДХОДЕ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОКАЗАТЕЛЯ И ПОСТРОЕНИЕ ШКАЛЫ ОЦЕНКИ ЗАЩИЩЕННОСТИ ОПАСНОГО ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОБЪЕКТА

Рыбаков А.В., Иванов Е.В., Седов Д.С., Овсянников Р.Е.

Академия гражданской защиты Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Химки, Россия

В статье представлен подход к определению значений показателя защищенности подвергшихся ударно-волновому воздействию опасных производственных объектов. Подход основан на энергетических методах. Дается геометрическая интерпретация определения значений показателя защищенности, для основных случаев разрушений. Приведен алгоритм градуировки условной шкалы защищенности для конкретного опасного производственного объекта с использованием численного эксперимента в программе SolidWorks Simulation. Полученные значения показателя применимы для разработки инженерно-технических мероприятий гражданской обороны, при количественной оценке мероприятий повышающих устойчивость функционирования объектов экономики.

**Ключевые слова:** ударная волна, импульс, давление, защищенность, обычные средства поражения, опасный производственный объект.

**DOI:** 10.22281/2413-9920-2017-03-03-344-352

Перед силами гражданской обороны в соответствие с Федеральным законом № 28 «О гражданской обороне» стоит задача по обеспечению устойчивости функционирования организаций, необходимых для выживания населения при военных конфликтах или вследствие этих конфликтов, а также при чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера [1]. В соответствии с СП 165.1325800.2014 «Инженерно-технические мероприятия по гражданской обороне» инженерно-технические мероприятия по гражданской обороне в совокупности с организационными мероприятиями составляют комплекс мероприятий, осуществляемых в целях решения задач гражданской обороны (далее - мероприятия по гражданской обороне) при проектировании, строительстве и эксплуатации, в том числе, и опасных производственных объектов [2]. Перечень и объем инженерно-технических мероприятий по гражданской обороне может планироваться только после проведения расчетов по наиболее возможным вариантам развития событий.

Для прогнозирования состояния опасных производственных объектов подвергшихся воздействию обычных средств поражения вероятного противника в ГОСТ Р 42.2.01-2014 «Гражданская оборона. Оценка состояния потенциально опасных объектов, объектов обороны и безопасности в условиях воздействия поражающих факторов обычных средств поражения» предложена методика

для проведения оперативных расчетов. Однако данная методика обладает рядом недостатков, указанных в [3], в том числе:

- учет действия на объект только избыточного давления воздушной ударной волны, при отсутствии рассмотрения вклада импульса в разрушение объектов;
- определение значений избыточного давления ударной волны без учета вида применяемых обычных средств поражения;
- отсутствие методик расчета степеней разрушения применительно к конкретным опасным производственным объектам, учитывающим особенности их проектных решений.

В качестве подхода, который позволит учесть эти недостатки, применим энергетические методы. Сущность энергетических методов состоит в анализе данных о максимальных напряжениях и деформациях при изгибе и сдвиге, которые может претерпеть конструктивный элемент в результате ударно-волновой нагрузки. Достоинством энергетических методов будет являться их проверка результатами экспериментальных данных, а также относительная простота в использовании. Кроме того, результаты расчетов могут быть представлены графически (рис. 1), что позволяет наглядно показать реакцию конструкций на ударно-волновую нагрузку.

В главе 4 источника [4] приводится подробный алгоритм решения задач энергетическим методом. Там же говорится и о предель-

ном упрощении и эмпирических формулах (будут представлены ниже). С помощью энергетических методов оцениваются механизмы квазистатического приложения нагрузки (приведенное давление -  $\langle P \rangle$ ) и импульсной нагрузки (приведенный импульс  $\langle i \rangle$ ).

По рассчитанным для каждого конструктивного элемента значениям приведенного давления и импульса строится точка на  $\langle P \rangle$ ,  $\langle i \rangle$  - диаграмме (рис. 1) и на основании ее положения относительно гиперболической кривой делают вывод о состоянии конструктивного элемента, подвергнутого ударно-волновой нагрузке.

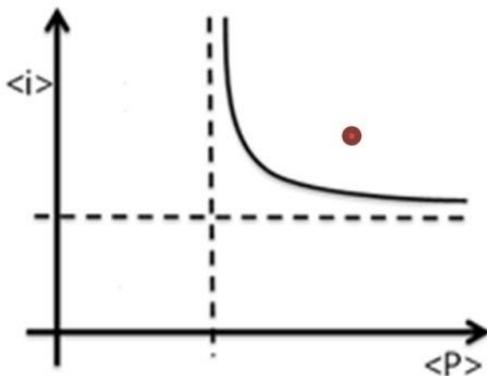


Рис. 1.  $\langle P \rangle$ ,  $\langle i \rangle$  - диаграмма с точкой, характеризующей состояние элемента

На рис. 1 представлена гиперболическая кривая, которая представляет собой линию равной степени повреждения конструкции (линию равновероятного поражения). Эта линия определяет комбинацию значений амплитуды приложенной нагрузки избыточного давления и импульса, необходимую для получения заданной деформации. Если на конструкцию действует нагрузка с такими значениями амплитуды и импульса, что изображающая точка находится выше кривой (рис. 1), то конструкция будет повреждена, поскольку в этом случае деформация превысит критическое значение [4].

Для упрощения анализа состояния конструктивного элемента по  $\langle P \rangle$ ,  $\langle i \rangle$  - диаграмме разбиваем ее на четверти (на рис. 1 – штриховые линии), как это сделано в [5]. При такой разбивке:

верхняя правая четверть -  $\langle P \rangle_{ac} > \langle P \rangle$  и  $\langle i \rangle_{ac} > \langle i \rangle$  разрушения конструктивного элемента будут значительными;

верхняя левая четверть -  $\langle P \rangle_{ac} < \langle P \rangle$  и  $\langle i \rangle_{ac} > \langle i \rangle$  будут незначительные разрушения конструктивного элемента, вызванные импульсным воздействием;

нижняя левая четверть -  $\langle P \rangle_{ac} < \langle P \rangle$  и  $\langle i \rangle_{ac} < \langle i \rangle$  разрушений конструктивных элементов не будет;

нижняя правая четверть -  $\langle P \rangle_{ac} > \langle P \rangle$  и  $\langle i \rangle_{ac} < \langle i \rangle$  будут незначительные разрушения конструктивного элемента, вызванные действием избыточного давления.

Для опасного производственного объекта в целом найти значения приведенного давления и импульса нельзя, оценка состояния возможна только при разбивке объекта на конструктивные элементы: плита, колонна, балка, лента (формулы расчета представлены в табл. 1) [5].

Кроме вывода о состоянии конструктивного элемента с помощью  $\langle P \rangle$ ,  $\langle i \rangle$  - диаграммы можно определить степень его защищенности от воздействия ударной волны, как это показано в [6]. Мерой степени защищенности будет являться показатель защищенности.

Под показателем защищенности понимается величина, позволяющая характеризовать способность объекта противостоять угрозам с сохранением возможности выполнять свои основные функции и задачи в условиях воздействия обычных средств поражения. Показатель защищенности определяется как отношение характеристик текущего состояния объекта к характеристикам его желаемого состояния - устойчивого функционирования объекта (нижняя левая четверть на рис. 1). Применительно к  $\langle P \rangle$ ,  $\langle i \rangle$  - диаграмме (рис. 2) значения показателя могут быть найдены по соотношению площадей:

$$k = \frac{S_1}{S_2}. \quad (1)$$

В качестве характеристик состояния объекта в предлагаемом подходе будут использоваться две величины – приведенное давление и приведенный импульс, которые будут являться функциями от параметров конструктивных элементов и характеристик воздушной ударной волны (давления и импульса), что в совокупности с разбивкой объекта на конструктивные элементы позволит избежать недостатков методики изложенной в ГОСТ Р 42.2.01-2014.

Таблица 1

Формулы расчета приведенных давления и импульса для основных типов конструктивных элементов

Конструктивный элемент	Формулы расчета	
	безразмерного давления	безразмерного импульса
Плита	$\langle P \rangle = \frac{\Phi_p \sigma_y h^2}{X^2}$	$\langle i \rangle = \frac{\Phi_i \sigma_y h \sqrt{\rho}}{\sqrt{E}}$
Колонна	$\langle P \rangle = \frac{\alpha_p E I}{A_1 L^2}$	$\langle i \rangle = \frac{\alpha_i \sqrt{m L I \sigma_y}}{A_1 \sqrt{E} h}$
Балка	$\langle P \rangle = \frac{\Psi_p \sigma_y Z}{b L^2}$	$\langle i \rangle = \frac{\Psi_i \sigma_y Z \sqrt{\rho A}}{b \sqrt{E} I}$
Лента	$\langle P \rangle = \frac{A \sigma_y \sqrt{\sigma_y^3}}{b L \sqrt{E}}$	$\langle i \rangle = \frac{A \sigma_y \sqrt{\rho}}{b \sqrt{E}}$

Примечание:  $X$  – половина короткого пролета плиты, м;  $E$  – модуль Юнга, Па;  $h$  – полная толщина, м;  $\sigma_y$  – предел текучести, напряжение, Па;  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $A$  – площадь поперечного сечения балки, м<sup>2</sup>;  $b$  – ширина балки, м;  $I$  – момент инерции поперечного сечения, м<sup>4</sup>;  $L$  – длина балки, м;  $Z$  – модуль пластического сопротивления, м<sup>3</sup>;  $\Phi_p, \Phi_i, \alpha_p, \alpha_i, \Psi_p, \Psi_i$  – безразмерные коэффициенты.

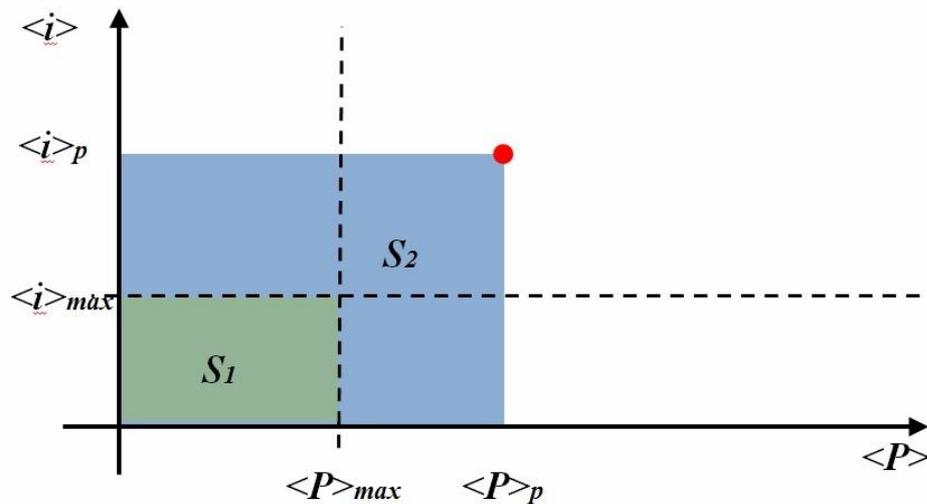


Рис. 2. Интерпретация формулы нахождения показателя защищенности

Формулы для расчета значений показателя защищенности в зависимости от области, характеризующей особенности разрушения объекта представлены на рис. 3.

Полученные значения показателя защищенности необходимо интерпретировать с точки зрения применения его на практике. Для этого требуются разработать шкалу оценки. За основу шкалы примем степени разрушений, определяемые согласно СП 165.1325800.2014.

Разрушения зданий и сооружений можно характеризовать четырьмя степенями:

- полные разрушения;
- сильные разрушения;
- средние разрушения;
- слабые разрушения.

Полное разрушение характеризуется обрушением зданий и сооружений, от которых могут сохраниться только поврежденные или неповрежденные подвалы, а также незначительная часть прочных конструктивных эле-

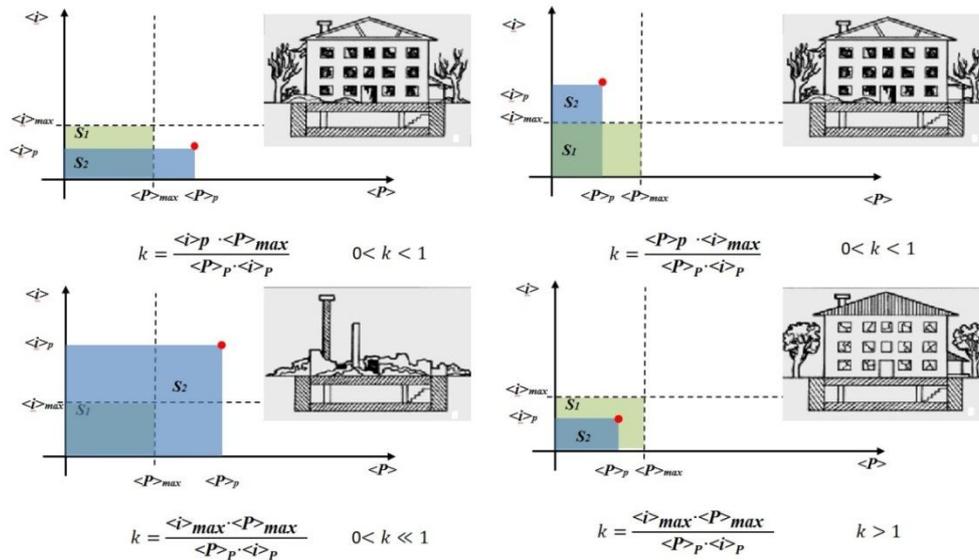


Рис. 3.  $\langle P \rangle$ ,  $\langle i \rangle$  - диаграмма с возможным положением точек характеризующих состояние элемента и формулы для расчета показателя защищенности

ментов. При полном разрушении образуется завал (левая нижняя схема рис. 3).

Для сильных разрушений характерно сплошное разрушение несущих конструкций зданий и сооружений. При сильных разрушениях могут сохраняться наиболее прочные конструктивные элементы здания и сооружения, элементы каркасов, ядра жесткости, частично стены и перекрытия нижних этажей. При сильном разрушении образуется завал.

Средние разрушения характеризуются снижением эксплуатационной пригодности зданий и сооружений. Несущие конструкции сохраняются и лишь частично деформируются, при этом снижается их несущая способность. Опасность обрушения отсутствует (верхние схемы рис. 3).

Для слабых разрушений характерно частичное разрушение внутренних перегородок, кровли, дверных и оконных коробок, легких пристроек и др. Основные несущие конструкции сохраняются (правая нижняя схема рис. 3) [2].

С целью разработки шкалы, для оценки значений показателя защищенности, было проведено сопоставление его значений со степенями разрушений конструкций, рассчитанных в ходе машинного эксперимента на основании прочностных испытаний конструктивных элементов зданий методом конечных элементов в программной среде Solid Works Simulation. Данный программный

продукт позволяет симулировать условия работы виртуальной модели в реальном масштабе, увидеть ее поведение в условиях нагрузки, напряжения и смещения. Программный комплекс систем автоматизированного проектирования (САПР) обеспечивает разработку изделий любой сложности и назначения. Его надежность подтверждается применением в различных сферах производства: от производства Олимпийских медалей (на Олимпийских Играх в Сочи в 2014 г.) [7] до проектирования и создания военно-морской техники [8].

Анализ реакций конструктивных элементов и сопоставление их со степенями разрушения осуществляется на положениях СП 63.13330.2012 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения.

Используемый метод конечных элементов применяется для различных задач механики деформируемого твердого тела [9]. Конечной задачей определения нагруженного деформированного состояния является отслеживание в каждой точке конструкции напряжений, деформаций и перемещений, возникающих в ней в результате воздействий на конструкцию механических нагрузок в процессе ее реальной работы. В трехмерной постановке определение поля перемещений заключается в определении компонентов перемещений по осям координат X, Y, Z во всех точках конструкции.

Метод конечных элементов заключается в том, что любая сложная пространственная реальная конструкция заменяется структурной моделью, состоящих из простейших компонентов, таких как стержни, пластины с известными упругими свойствами.

Затем на элементах фиксируется конечное число узлов и считается, что конечные элементы соединяются между собой в этих узлах. Нумеруются узлы и элементы. Эта операция часто называется генерацией конечноэлементной сетки.

По принятым законам аппроксимации определяются перемещения внутри элементов. Из перемещений на основе уравнений определяется деформация в каждом элементе. По деформациям в каждом элементе определяются напряжения [10].

В качестве примера для проведения численного эксперимента рассмотрим здание компрессорного цеха компрессорной станции (рис. 4) с характеристиками конструктивных элементов, представленными в табл. 2.

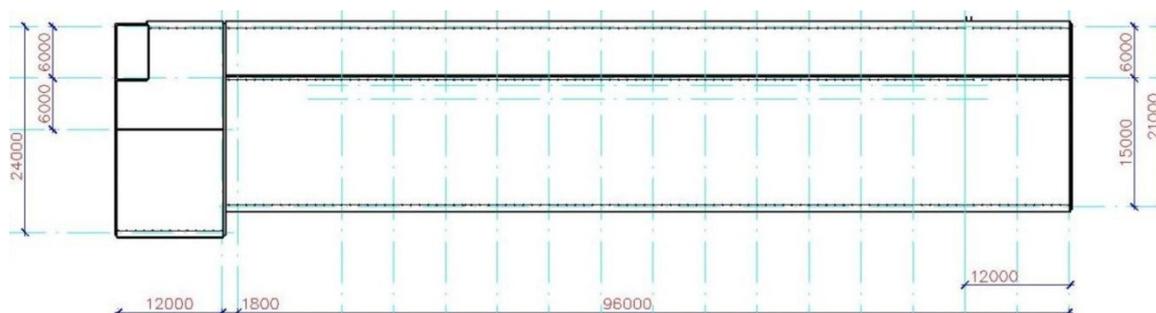


Рис. 4. Схема компрессорного цеха

Таблица 2

Характеристики конструктивных элементов компрессорного цеха

Наименование объекта	Размеры			Характеристики конструкции				
	Длина, м	Ширина, м	Высота, м	Материал и толщина стен	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа
Конструкция компрессорного цеха	108	21,0	16,8	Трехслойные стеновые панели 120 мм	$0,08 \cdot 10^5$	0,2	–	7,23
Компрессорный цех и ГЩУ								
Колонны	0,5	0,5	16,8	Двугавр 60, 50Б1	$2,06 \cdot 10^5$	0,3	345	490
Балки	15	0,3	0,3	Двугавр 60, 40Б1	$2,06 \cdot 10^5$	0,3	345	490
Перекрытия	15	12	0,25	Сборные пустотные ж/б плиты		0,2		

На основании схемы конструктивных элементов с заданными характеристиками в среде Solid Works Simulation создается модель компрессорного цеха. Далее проводится расчет реакции модели на ударно-волновое воздействие, вызванное применением определенного вида обычных средств поражения (в рассматриваемом примере – авиабомба М-110). Реакция модели на ударно-волновое воздействие рассчитывается для нескольких расстояний до

эпицентра взрыва авиабомбы (пример одного из расчетов представлен на рис. 5).

Для соотнесения значений максимальной деформации полученной в численном эксперименте, со значениями показателя защищенности, построили таблицу (табл. 3) для каждого сценария воздействия обычных средств поражения. При этом значения избыточного давления и импульса для расчетов определяли по формулам [11].

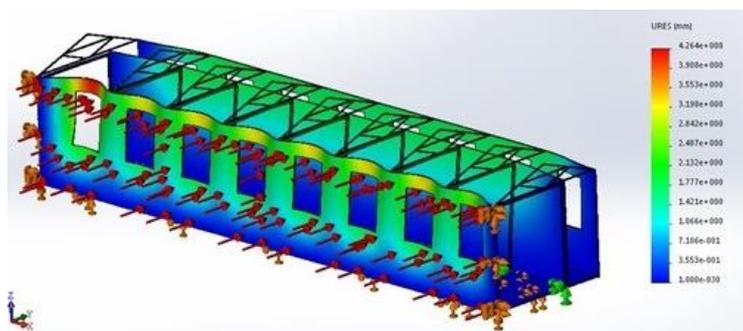


Рис. 5. Пример расчета состояния объекта воздействия ударно-волновой нагрузки в программе Solid Works Simulation

Таблица 3

Результаты расчета машинного эксперимента и соответствующих им значений показателя защищенности (для авиабомбы М-110)

Расстояние от центра взрыва, м	Давление	Импульс, кг*м/с	Перемещение U, мм	Показатель защищенности
5	108446	54,87	2696	0,00011
10	14646	27,43	407	0,0017
15	4695	18,29	128,5	0,081
20	2144	13,71	58,7	0,23
21	1882	13,06	51,53	0,28
22	1664	12,47	45,6	0,33
23	1479	11,92	40,49	0,39
24	1322	11,43	36,2	1,04
40	367	6,86	10,1	3,08
68	1571	4,73	4,30	9,39

По результатам численного эксперимента построим шкалу (рис. 6), характеризующую степень разрушения здания (конструктивного элемента), по уже ранее перечисленным параметрам.

За «0» значение показателя защищенности принимается полная потеря несущей способности всех конструктивных элементов рассматриваемого объекта, что соответствует его полному разрушению. За значение показателя защищенности равное «1» принимается упругая деформация всех конструктивных элементов объекта, за исключением остекления, что соответствует слабому разрушению. При дальнейшем уменьшении значений приведенного давления и импульса можно говорить о вырождении ударной волны в акустическую и отсутствию разрушений, что будет соответствовать значениям показателя защищенности больше «9,39» в рассматриваемом примере.

В работе приведен подход к нахождению комплексного показателя, характеризующего

защищенность объекта и позволяющего учитывать особенности сценария применения обычных средств поражения и конструктивных особенностей объекта. Построена шкала соответствия степеней разрушения и значений показателя защищенности, что позволит использовать значения показателя в целях проведения оперативной оценки последствий применения противником обычных средств поражений. Кроме того с помощью показателя защищенности возможно проведение количественной оценки мероприятий повышения защищенности основных производственных фондов при разработке инженерно-технических мероприятий гражданской обороны.

#### Список литературы

1. Федеральный закон от 12.02.1998 № 28-ФЗ «О гражданской обороне».
2. Свод правил СП 165.1325800.2014 «Инженерно-технические мероприятия по гражданской обороне» (утв. и введен в дей-

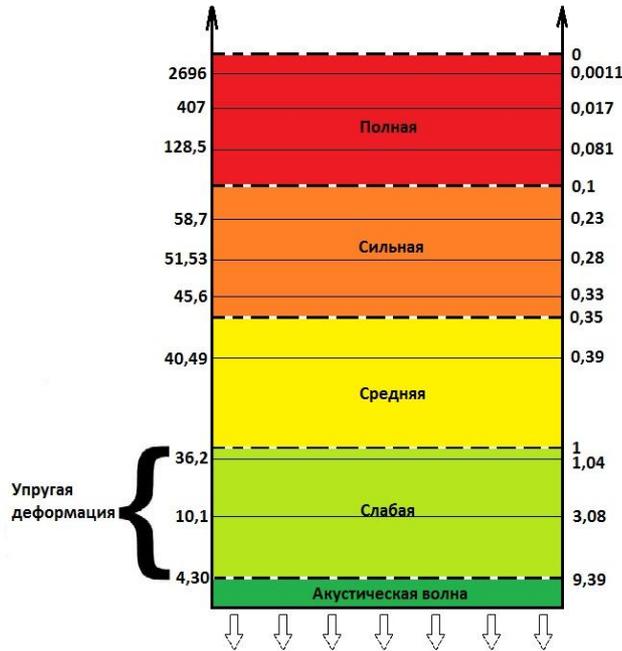


Рис. 6. Шкала соответствия значений численного эксперимента с рассчитанными значениями показателя защищенности

стве Приказом Минстроя России от 12.11.2014 № 705/пр).

3. Мухин, В.И. О методике оценки состояния потенциально опасных объектов при воздействии воздушной ударной волной от обычных средств поражения / В.И. Мухин, А.В. Рыбаков, Е.В. Иванов, Г.В. Панин // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2017. - №1 - С.7-15.

4. Бейкер, У. Взрывные явления. Оценка и последствия: В 2-х кн. / У. Бейкер, П. Кокс, П. Уэстайн. - М.: Мир, 1986. – 319 с.

5. Рыбаков, А.В. Научно-методический аппарат обоснования системы прогнозирования чрезвычайных ситуаций техногенного характера на пожаровзрывоопасном объекте. Автореферат диссертации ... д-ра техн. наук / Рыбаков Анатолий Валерьевич. – Химки, 2015. - 48 с.

6. Рыбаков, А.В. О подходе к определению показателя защищенности зданий и сооружений опасного производственного объекта / А.В. Рыбаков, Е.В. Иванов, А.М. Савинов, И.Я. Геккель // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2017. - №2 - С.33-40.

7. Олимпийское золото «куется» в SolidWorks // САПР и графика. – 2014. - №2 – С.80-84.

8. Аверин, И.В. Применение SolidWorks для создания военно-морской техники / И.В. Аверин, Н.С. Щербаков // Машиностроение и смежные отрасли. – 2013. - №1 – С. 1-3.

9. Фокин, В.Г. Метод конечных элементов в механике деформируемого твёрдого тела / В.Г.Фокин. – Самара: СГТУ, 2010. – 131 с.

10. Алямовский, А.А. SolidWorks / COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов / А.А. Алямовский. – М.: ДМК-Пресс, 2004. – 432 с.

11. Кочетков, К.Е. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий / К.Е. Кочетков, В.А. Котляревский, А.В. Забегаев. - М.: Ассоциация строительных ВУЗов. 1996. – 383 с.

#### Сведения об авторах

Рыбаков Анатолий Валерьевич - доктор технических наук, доцент, начальник лаборатории информационного обеспечения населения и технологий информационной поддержки РСЧС ФГБВОУ ВО «Академии

гражданской защиты МЧС России», *anatoll\_rubakov@mail.ru*.

Иванов Евгений Вячеславович - адъюнкт научно-исследовательского центра ФГБВОУ ВО «Академии гражданской защиты МЧС России», *linia-zhizni@yandex.ru*.

Седов Дмитрий Сергеевич - оператор лаборатории информационного обеспечения населения и технологий информационной

поддержки РСЧС ФГБВОУ ВО «Академии гражданской защиты МЧС России», *agzsedov@yandex.ru*.

Овсянников Роман Евгеньевич - оператор лаборатории информационного обеспечения населения и технологий информационной поддержки РСЧС ФГБВОУ ВО «Академии гражданской защиты МЧС России», *re.ovsy@gmail.com*.

## ABOUT THE APPROACH TO DETERMINING THE INDICATOR AND CONSTRUCTING THE SCALE OF EVALUATING THE PROTECTION OF A DANGEROUS PRODUCTION OBJECT

Rybakov A.V., Ivanov E.V., Sedov D.S., Ovsyannikov R.E.

Academy of Civil Defense of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Khimki, Russian Federation

The article presents an approach to determining the values of the protection index of hazardous industrial facilities exposed to shock-wave action. The approach is based on energy methods. A geometric interpretation of the definition of the values of the protection index is given, for the main cases of destruction. The algorithm for grading the conditional security scale for a specific hazardous production facility is presented using a numerical experiment in the SolidWorks Simulation program. The obtained values of the indicator are applicable to the development of engineering and technical measures of civil defense, with a quantitative evaluation of measures that increase the stability of the functioning of economic objects.

**Keywords:** *shock wave, impulse, pressure, security, conventional means of destruction, dangerous production facility.*

**DOI:** 10.22281/2413-9920-2017-03-03-344-352

### References

1. Federal Law of 12.02.1988 No. 28-FZ "On Civil Defense". (In Russian)

2. Code of Regulations SP 165.1325800.2014 "Engineering and technical measures for civil defense" (approved and put into effect by Order of the Ministry of Construction of Russia from 12.11.2014 No. 705 / pr). (In Russian)

3. Mukhin V.I., Rybakov A.V., Ivanov E.V., Panin G.V. About a technique of an estimation of a condition of potentially dangerous objects at influence by an air shock wave from usual means of defeat. *Scientific and educational problems of a civil protection*, 2017, No.1, pp. 7-15. (In Russian)

4. Baker U., Cox P., Westin P. Explosive phenomena. Evaluation and consequences. Moscow, Mir, 1986. 319 p. (In Russian)

5. Rybakov A.V. Scientific and methodical apparatus for substantiating systems for forecasting emergency situations of a technogenic nature in a fire and explosion hazard facility. Khimki, 2015, 48 p. (In Russian)

6. Rybakov A.V., Ivanov E.V., Savinov A.M., Haeckel I.Ya. *On the science and education of the problem of civil protection*, 2017, No.2, pp.33-40. (In Russian)

7. Olympic gold is "forged" in SolidWorks. *CAD and graphics*, 2014, No.2, pp. 80-84. (In Russian)

8. Averin I.V., Shcherbakov N.S Application of SolidWorks for the creation of naval equipment. *Mechanical engineering and related industries*, 2013, No.1, pp. 1-3. (In Russian)

9. Fokin V.G. The finite element method in mechanics of a deformable solid body. Samara, SGTU, 2010. 131 p. (In Russian)

10. Alyamovsky A.A. SolidWorks / COSMOSWorks. Engineering analysis by the finite element method. Moscow, DMK-Press, 2004. 432 p. (In Russian)

11. Kochetkov K.E., Kotlyarevsky V.A., Zabegaev A.V. Accidents and disasters. Prevention and elimination of consequences. Moscow, Association of construction universities, 1996. 383 p. (In Russian)

#### **Authors' information**

Anatoliy V. Rybakov - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Laboratory of Information Support for the Popula-

tion and Information Support Technologies of the ESIA FGGBU in the Academy of Civil Protection of the Ministry of Emergencies of Russia, *anatoll\_rubakov@mail.ru*.

Evgeny V. Ivanov - adjunct of the FGB-BUU research center in the Academy of Civil Protection of the Ministry of Emergencies of Russia, *linia-zhizni@yandex.ru*.

Dmitriy S. Sedov - operator of the laboratory of information support of the population and information support technologies of the EMERCOM of the FGBIU in the Academy of Civil Protection of the Ministry of Emergencies of Russia, *agzsedov@yandex.ru*.

Roman E. Ovsyannikov - operator of the laboratory of informational support of the population and information support technologies of the EMERCOM of the FGBIU in the "Academy of Civil Protection of the Ministry of Emergencies of Russia", *re.ovsy@gmail.com*.

Дата публикации  
(Date of publication):  
25.09.2017

