

Аналитическая оценка взрывного воздействия на объекты и методика планирования аварийно-восстановительных работ

Александр Алексеевич Руденко ✉

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальность аналитического исследования объясняется тем обстоятельством, что к настоящему времени характер и последствия взрывного воздействия на здания и защищенные сооружения исследованы недостаточно и требуют дополнительного анализа и уточнения особенностей проведения аварийно-восстановительных работ.

Целью исследования является аналитический обзор взрывного воздействия на здания, защитные сооружения гражданской обороны (ЗСГО) и их входы (выходы), с разработкой методики планирования аварийно-восстановительных работ.

Теоретические основы. Уточнен состав потенциальных источников взрывного воздействия. Рассмотрены расчетная схема воздействия воздушной ударной волны (ВУВ) и волны сжатия на наземное здание и подземное сооружение, варианты размещения защитных сооружений в различных типах грунтов, а также характер сейсмозрывного воздействия на подземные сооружения.

Результаты и их обсуждение. Проанализированы схема воздействия ВУВ на наземные и подземные эксплуатируемые объекты капитального строительства (ОКС), в том числе и с учетом возможного обрушения наземной части здания на ЗСГО, размещаемые, как правило, не отдельно стоящими, а как подземная часть наземного здания. Проанализированы вероятность и степень разрушения наземных и подземных зданий и сооружений. Оценены варианты использования входов (выходов) из ЗСГО для эвакуации людей.

Выводы. Проведенное исследование позволило определить, что степень повреждения ОКС для всех видов источников взрыва и боеприпасов (в обычном и ядерном исполнении) определяется техническими характеристиками взрывчатого вещества или ядерного заряда, мощностью взрыва, расстоянием до места взрыва, местоположением взрыва (наземный, подземный, воздушный), конструктивными особенностями зданий и сооружений, наличием преград (экранов). Кроме того, следует предусматривать опасные условия воздействия на ОКС от взрыва ядерного заряда. Наибольшую степень защищенности от воздействия ВУВ имеют сквозниковые входы ЗСГО, в отличие от тупиковых, шахтных, прямых и встроенных. В случае если ЗСГО является подземной частью наземного здания, при его разрушении взрывом высока вероятность того, что эвакуировать людей не представится возможным и потребуются аварийно-восстановительные работы для расчистки и восстановления входов (выходов) от образовавшихся завалов.

Ключевые слова: повреждения и разрушения зданий; входы убежищ; защитные сооружения

Данная работа публикуется по результатам выполнения гранта НПР СПбГАСУ № 20-НПР-25 «Организация восстановления и ремонта зданий после взрывного воздействия на основе комплексного подхода с использованием лазерного сканирования, нейросетевого и 3-D моделирования».

Для цитирования: Руденко А.А. Аналитическая оценка взрывного воздействия на объекты и методика планирования аварийно-восстановительных работ // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 5. С. 27–46. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.05.27-46

✉ Руденко Александр Алексеевич, e-mail.rudenkoa.a@mail.ru

Analytical assessment of explosive impact on facilities and methodology for planning emergency recovery operations

Aleksander A. Rudenko ✉

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The relevance of the analytical study is explained by the fact that to date the nature and consequences of explosive impact on buildings and protected structures have not been sufficiently investigated and require additional analysis and clarification of the features of emergency recovery operations.

The purpose of the study is an analytical review of the explosive impact on buildings, civil defence protective structures (CDPS) and their entrances (exits), with the development of a methodology for planning emergency recovery operations.

Theoretical foundations. The composition of potential sources of explosive impact is specified. The design scheme of the impact of air shock wave (ASW) and compression wave on the surface building and underground structure, options for the placement of protective structures in different types of soils, as well as the nature of seismic-explosive impact on underground structures are considered.

The results and their discussion. The scheme of ASW impact on above-ground and underground operated capital construction facilities (CCF) was analyzed, including taking into account the possible collapse of the above-ground part of the building at the CDPS placed, as a rule, not separately standing, but as an underground part of the above-ground building. The probability and degree of collapse of above-ground and underground buildings and structures have been analyzed. The options of using entrances (exits) from CDPS for evacuation of people are assessed.

Conclusions. The study allowed us to determine that the extent of damage to the CCF for all types of explosion sources and munitions (conventional and nuclear) is determined by the technical characteristics of the explosive or nuclear charge, the explosion yield, the distance to the explosion site, the location of the explosion (above-ground, underground, airborne), the structural features of buildings and structures, and the presence of barriers (shields). In addition, it is necessary to provide for hazardous conditions of impact on the CCF from the explosion of a nuclear charge. The greatest degree of protection from the impact of ASW is provided by through-entrances of CDPS, as opposed to dead-end, shaft, straight and built-in entrances. In case a CDPS is an underground part of an aboveground building, in case of its destruction by an explosion, it is highly probable that it will be impossible to evacuate people and emergency recovery operations will be required to clear and restore entrances (exits) from the resulting debris.

Keywords: damage and destruction of buildings; shelter entrances; and defensive structures

This work is published based on the results of the implementation of the NPR grant No. 20-NPR-25 "Organization of restoration and repair of buildings after an explosive impact, based on an integrated approach using laser scanning, neural network and 3-D modelling".

For citation: Rudenko A.A. Analytical assessment of explosive impact on facilities and methodology for planning emergency recovery operations. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(5):27-46. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.05.27-46 (rus).

✉ Aleksander Alekseevich Rudenko, e-mail.rudenko.a@mail.ru

Введение

В условиях современного производственно-технологического уклада экономики взрывное воздействие на строительные конструкции зданий и сооружений следует учитывать как один из реальных факторов воздействия на эксплуатируемый производственный объект [1, 2]. Указанное особенно актуально для опасных производственных объектов и объектов, находящихся вблизи, что объясняется сложностью технологических процессов, опасностью их составляющих, факторами чрезвычайных ситуаций^{1,2} (ЧС) различного происхождения, ставшими источниками взрывов на объектах, связанных с эксплуатацией, исследованием, хранением или транспортировкой веществ (элементов, устройств), которые могут привести к взрыву.

Для защиты людей от воздействия опасных производственных факторов на таких объектах и в местах жизнедеятельности людей устраиваются защитные сооружения гражданской обороны (ЗСГО), которые в соответствии с СП 88.13330.2014³ должны оборудоваться надлежащим образом в виде встроенных,

пристроенных, отдельно стоящих, заглубленных или возвышающихся над землей помещений или сооружений. Такие объекты должны обеспечивать гарантированную степень защиты от заданных факторов воздействия на человека в течение предусмотренного времени и быть всегда в надлежащем техническом состоянии.

Техническое состояние зданий и сооружений, в том числе и ЗСГО, оцениваемое через их категории, является определяющим для потенциальной возможности эксплуатации и планирования мероприятий по поддержанию объектов в надлежащем состоянии. В условиях обычного «производственно-бытового» функционирования техническое состояние объектов определяется в основном параметрами их физического и морального износа, и возможно снижаясь в связи с нарушениями, допущенными в процессе проектирования, строительства или повседневной эксплуатации [3, 4].

В режиме мониторинга это оценивается и прогнозируется достаточно точно, что подтверждено практикой эксплуатации зданий и сооружений. Однако при воздействии аварийных взрывных нагрузок характер воздействия и повреждений строительных конструкций и здания в целом часто определить сложно, что объясняется комплексом субъективных и объективных причин.

При этом вопросам оценки характера и последствий чрезвычайных ситуаций техногенного характера посвящен ряд исследований, что рассматривалось в том числе и в работах таких ученых, как Д.А. Король-

¹ В Нью-Дели произошло землетрясение // РИА НОВОСТИ. URL: <https://ria.ru/20250217/zemletryasenie-1999739931.html> (дата публикации: 17 февраля 2025).

² Rheinmetall не считает взрыв на заводе в Испании терактом // РИА НОВОСТИ. URL: <https://ria.ru/20250217/zemletryasenie-1999739931.html> (дата публикации: 31 января 2025).

³ СП 88.13330.2014. Свод правил. Защитные сооружения гражданской обороны. Актуализированная редакция СНиП II-11-77* (утв. Приказом Минстроя России от 18.02.2014 № 59/пр) (ред. от 23.01.2019).

ченко, А.Я. Корольченко, А.Н. Бирюков, Ю.А. Бирюков, Е.В. Гвоздев, К.В. Фролов, Н.А. Махутов, Н.Л. Кучин, В.Н. Клочков, Ю.Г. Матвиенко, Е.В. Кловач, С.Н. Буйновский, В.И. Сидоров, А.С. Печеркин, А.И. Гражданкин, М.В. Лисанов, Н.Г. Топольский, Н.А. Акимов, А.Н. Баратов, Н. Kumamoto, E. Henley, R. Billinton, S. Ghosh, A. Zaboli, J. Hong, J. Kwon, T. Vjerga, T. Aven, E.V. Zio и др. Однако вопросы оценки последствий взрывного воздействия на опасных производственных объектах (ОПО), определяемых законом № 116-ФЗ⁴, влияние взрывных нагрузок на здания и сооружения, а также проведение аварийно-восстановительных работ после такого воздействия исследованы недостаточно.

Актуальность аналитического исследования объясняется тем обстоятельством, что к настоящему времени характер и последствия взрывного воздействия на здания и защитные сооружения исследованы недостаточно и требуют дополнительного анализа и уточнения особенностей проведения аварийно-восстановительных работ.

Целью исследования является аналитический обзор взрывного воздействия на здания, защитные сооружения гражданской обороны и их входы (выходы), с обоснованием возможности использования входов для эвакуации людей из защитных сооружений после взрывного воздействия.

Задачи исследования:

- анализ воздействия воздушной ударной волны (ВУВ) на строительные конструкции наземных

⁴ О промышленной безопасности опасных производственных объектов : Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ (с изменениями от 08.08.2024 г.) // Гарант. URL: <https://base.garant.ru/11900785> (дата обращения: 26 апреля 2025).

и подземных эксплуатируемых объектов капитального строительства (ОКС);

- аналитический обзор степеней повреждения наземных зданий и возможности эвакуации людей из защищенных сооружений;
- обоснование основных этапов аварийно-восстановительных работ.

Теоретические основы

В общем виде понятие и виды взрывов представлены на рис. 1. Анализируя реальные обстоятельства и источники взрывного воздействия на строительные конструкции объектов капитального строительства ОКС, следует исходить из потенциальной опасности не только в связи с техногенными авариями на потенциально опасном объекте (ПОО) от: взрывчатых веществ, сжиженного газа, горючих веществ, элементов потенциально опасных производственных объектов [5], но и от иных устройств различного типа (табл. 1). За основу данных таблицы приняты материалы Руководства... РБ Г-05-039-96⁵, дополненные автором. Кроме того, следует учитывать потенциальную возможность детонации взрывчатых веществ в составе боеприпасов различного типа (табл. 2)^{6, 7}.

⁵ РБ Г-05-039-96. Руководство по анализу опасности аварийных взрывов и определению параметров их механического действия. М. : Росатомнадзор, 2000. С. 29.

⁶ Об использовании атомной энергии : Федеральный закон от 21.11.1995 № 170-ФЗ (ред. от 26.12.2024).

⁷ Об утверждении перечня предприятий и организаций, в состав которых входят особо радиационно-опасные и ядерно-опасные производства и объекты, осуществляющие разработку, производство, эксплуатацию, хранение, транспортировку, утилизацию ядерного оружия, компонентов ядерного оружия, радиационно-опасных материалов и изделий : Постановление Правительства РФ от 7 марта 1995 г. № 238.

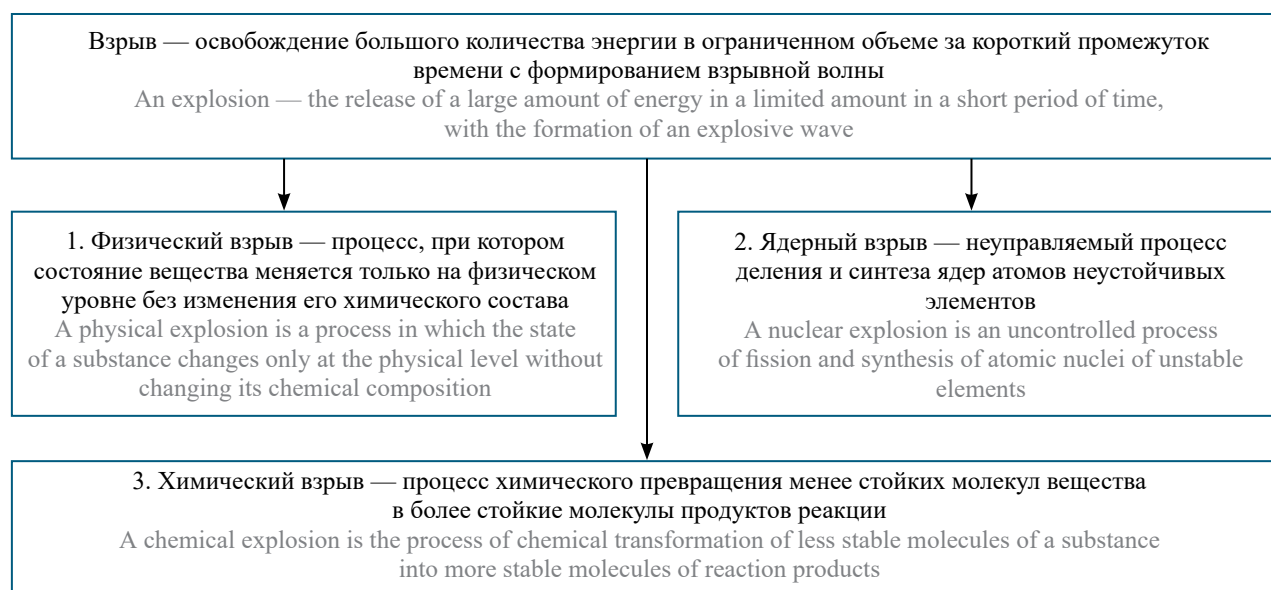


Рис. 1. Виды взрывов с учетом воздействия на строительные конструкции объектов

Fig. 1. Types of explosions, taking into account the impact on building structures of objects

Таблица 1. Перечень потенциальных источников аварийных взрывов на производственных и гражданских объектах⁴
Table 1. List of potential sources of emergency explosions at industrial and civil facilities⁴

Идентификационный признак Identification feature	Наименование объекта опасности Name of the danger object	Определяемые технические характеристики Defined technical characteristics	Рекомендуемая расчетная модель Recommended calculation model
Взрывчатое вещество. Обычное взрывчатое вещество (ВВ), обычные боеприпасы (ОБ), ядерное устройство (ЯУ)* — реактор, установка, заряд ^{6,7} An explosive substance. Conventional explosive, conventional ammunition, nuclear device* — reactor, installation, charge ^{6,7}	В процессе хранения — склады, хранилища. При перевозке — емкости, упаковка, транспортные средства. При исследовании, испытании, переработке, производстве — места их размещения In the process of storage-warehouses, storages During transportation — containers, packaging, vehicles. During research, testing, processing, and production — their locations	Место взрыва и расстояние до расчетной точки. Масса, структура и геометрические параметры. Вид ВВ и его эквивалент The location of the explosion and the distance to the calculated point. Mass, structure, and geometric parameters. Type of explosive and its equivalent	Детонация Detonation
Энергоносители в резервуарах Energy carriers in reservoirs	Цистерны, емкости, баллоны, ресиверы Tanks, tanks, cylinders, receivers	Избыточное давление в резервуаре. Тип вещества. Физико-химические характеристики детонации Excessive pressure in the tank The type of substance. Physico-chemical characteristics of detonation	Дефлаграция, детонация, разрушение стенок резервуара Deflagration, detonation, and destruction of tank walls
Расходуемые энергоносители Consumable energy resources	Машины и механизмы на газовых смесях. Дизельные, котельные, водородные станции Machines and mechanisms powered by gas mixtures. Diesel, boiler, and hydrogen stations	Тип, объем, физико-химические характеристики энергоносителя. Параметры внутреннего объема Type, volume, physico-chemical characteristics of the energy carrier. Internal volume parameters	Дефлаграция или детонация Deflagration or detonation
Сосуды высокого давления High-pressure vessels	Баллоны со сжатыми инертными газами (воздух, пропан, бутан, азот, аргон, гелий и т.д.) Cylinders with compressed inert gases (air, propane, butane, nitrogen, argon, helium, etc.)	Параметры сосуда (объем, давление), тип газовой смеси Vessel parameters (volume, pressure), the type of gas mixture	Разрушение резервуаров внутренним давлением Destruction of reservoirs by internal pressure

Примечание: * — дополнено автором.

Note: * — added by the author.

Анализ существующей информации [6] позволяет прогнозировать, что из имеющихся видов взрывчатых веществ (ВВ) (инициирующих, метательных и бризантных) наибольшую опасность (при равных объемах) представляют бризантные — повышенной мощности (ТЭН, гексоген, тетрил) и номинальной (тротил, пластит и пикриновая кислота (табл. 2). Могут использоваться и ВВ пониженной мощности (аммонит, динамон, аммонал), которые приведут к существенному повреждению ОКС. Большую степень защиты имеют защитные сооружения гражданской обороны [7, 8].

При этом следует учитывать несомненные преимущества и перспективы применения в промышлен-

ности ядерных устройств, использующих механизмы и реакции «деления, синтеза, деления – синтеза», что кроме высокого эффекта применения создает и высокие риски последствий при авариях [9]. Подтверждением чему являются аварии на Чернобыльской АЭС и АЭС Фукусима-1. Существующие в настоящее время результаты произошедших аварий позволяют утверждать, что, в связи с возможностью влиять на происходящие в устройстве процессы, вероятность мгновенного высвобождения энергии, т.е. взрыва, из ядерных устройств (например, реактора) остается невысокой [10].

Указанные в табл. 1 источники взрыва в зависимости от основных факторов, особенно от места

Таблица 2. Перечень взрывчатых веществ в процессе их производства, хранения, транспортировки
Table 2. List of explosives, in the process of their production, storage, transportation

Характеристики взрывчатых веществ Characteristics of explosives			
Тип носителя Media type	Тип взрывчатого вещества Type of explosive	Технические характеристики Technical specifications	Степень разрушения объекта The degree of destruction of the object
<p>Артиллерийский снаряд, мина. Тип: осколочный, фугасный, осколочно-фугасный, касетный, броневой, подкалиберный, кумулятивный, бетонобойный An artillery shell, a mine. Type: fragmentation, high-explosive, high-explosive fragmentation, cluster, armor-piercing, sub-caliber, cumulative, concrete-piercing</p>	<p>Тротил, пикриновая кислота, тетрил, гексоген, порох и т.д. TNT, picric acid, tetryl, hexogen, gunpowder, etc.</p>	<p>Тип взрывчатого вещества. Калибр, мм. Масса снаряда, кг. Масса сердечника, кг. Начальная скорость, м/с. Дульная энергия. Пробиваемость Type of explosives. Caliber, mm. Projectile mass, kg. Core mass, kg. Muzzle velocity, m/s. Muzzle energy. Penetrability</p>	<p>В зависимости от технических характеристик б/п, мощности взрыва и расстояния до места взрыва, конструктивных особенностей здания, наличия преград Depending on the technical characteristics of the second-hand vehicle, the explosion power and the distance to the explosion site, the structural features of the building, and the presence of obstacles</p>
<p>Авиабомба. Тип: фугасная, осколочно-фугасная, осколочная, объемно-детонирующая, проникающая фугасная, бетонобойная, броневая, противотанковая, касетная The aerial bomb. Type: high-explosive, high-explosive fragmentation, fragmentation, volume-detonating, penetrating high-explosive, concrete-piercing, armor-piercing, anti-tank, cluster</p>	<p>Тип взрывчатого вещества: то же, что и п. 1 Type of explosive: the same as paragraph 1</p>	<p>Тип. Длина. Диаметр. Масса. Тип боевой части. Масса боевой части. Масса взрывчатого вещества Type. Length. Diameter. Weight. Type of warhead. The mass of the warhead. Explosive mass</p>	<p>В зависимости от технических характеристик б/п, мощности взрыва и расстояния до места взрыва, конструктивных особенностей здания, наличия преград Depending on the technical characteristics of the second-hand vehicle, the explosion power and the distance to the explosion site, the structural features of the building, and the presence of obstacles</p>
<p>Ракеты. Тип траектории: баллистические, крылатые (дозвуковые, сверхзвуковые, гиперзвуковые) Rockets Trajectory type: ballistic, cruise (subsonic, supersonic, hypersonic)</p>	<p>Тип взрывчатого вещества: нитросоединения (тротил, нитрометан, нитронафталины и т.д.); нитраминны (тетрил, гексоген, октоген, тилен); нитраты спиртов (нитроглицерин, нитроглицоль) и др. Type of explosive: nitro compounds (TNT, nitromethane, nitronaphthalenes, etc.); nitramines (tetryl, hexogen, octogen, thylene); nitrates of alcohols (nitroglycerin, nitroglycol), etc.</p>	<p>Тип траектории полета. Место, направленность запуска. Дальность полета. Тип двигателя. Тип боеголовки. Тип систем управления и наведения Type of flight path. Location, direction of launch. The range. Flying. Engine type. The type of warhead. Type of control and guidance systems</p>	<p>В зависимости от технических характеристик б/п, мощности взрыва и расстояния до места взрыва, конструктивных особенностей здания, наличия преград Depending on the technical characteristics of the second-hand vehicle, the explosion power and the distance to the explosion site, the structural features of the building, and the presence of obstacles</p>

Характеристики взрывчатых веществ Characteristics of explosives			
Тип носителя Media type	Тип взрывчатого вещества Type of explosive	Технические характеристики Technical specifications	Степень разрушения объекта The degree of destruction of the object
Беспилотные летательные аппараты. Тип боеприпасов: осколочные, фугасные, осколочно-фугасные, кумулятивные, термобарические, тандемные Unmanned aerial vehicles Type of portable ammunition: fragmentation, high-explosive, high-explosive fragmentation, cumulative, thermobaric, tandem	Тип взрывчатого вещества, сбрасываемый или встроенный конструктивно The type of explosive that can be dropped or embedded structurally	Тип взрывчатого вещества. Вес. Размер и форма. Скорость, высота полета. Дальность полета. Тип взлета и посадки. Масса дополнительной нагрузки. Система управления Type of explosive. Weight. Size and shape. Speed and altitude of flight. Flight range. The type of takeoff and landing. A lot of additional loads. The management system	В зависимости от технических характеристик б/п, мощности взрыва и расстояния до места взрыва, конструктивных особенностей здания, наличия преград Depending on the technical characteristics of the second-hand vehicle, the explosion power and the distance to the explosion site, the structural features of the building, and the presence of obstacles

расположения источника взрыва, типа взрывчатого вещества, физико-химических параметров детонации, направленности, массы, приведут к различной степени повреждений зданий и сооружений

в результате воздействия ВУВ. При этом ВУВ определяется как область резкого уплотнения воздушной среды, распространяющаяся от центра взрыва со сверхзвуковой скоростью [11].

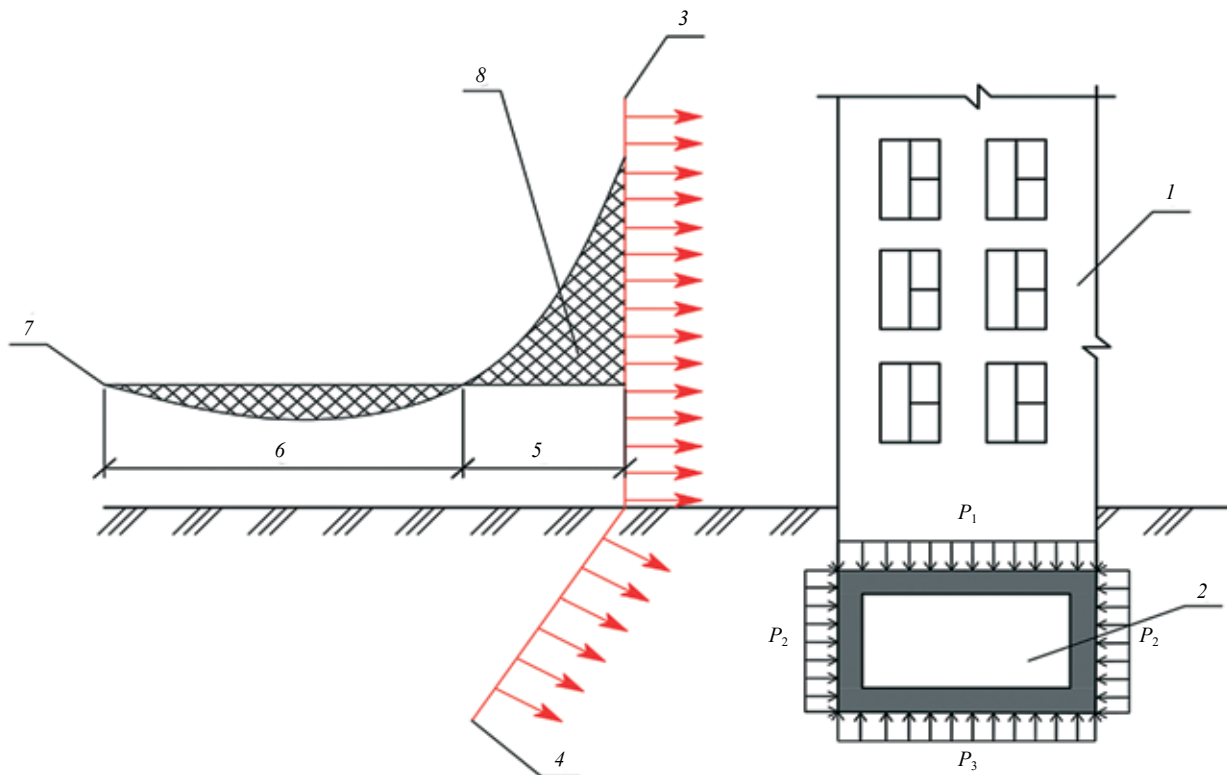


Рис. 2. Расчетная схема воздействия взрывной волны на наземные и подземные объекты: 1 — наземное здание; 2 — подземное сооружение; 3 — фронт воздушной ударной волны (ВУВ); 4 — фронт волны сжатия в грунте; 5 — фаза сжатия во фронте ВУВ; 6 — фаза разряжения за фронтом ВУВ; 7 — атмосферное давление; 8 — импульс ударной волны в фазе сжатия
Fig. 2. Calculation scheme of the impact of an explosive wave on ground and underground facilities: 1 — ground building; 2 — underground structure; 3 — air shock wave front (ASW); 4 — compression wave front in the ground; 5 — compression phase in the ASW front; 6 — discharge phase behind the ASW front; 7 — atmospheric pressure; 8 — the shock wave pulse in the compression phase

Хотя, конечно, для полноты оценки воздействия на строительные конструкции следует предусматривать комплексное воздействие и ВУВ и механическое (осколочное) воздействие взрыва от элементов самого источника взрыва или элементов среды, в которой произошел взрыв.

Результаты и их обсуждение

Расчетная схема оценки последствий взрывного воздействия на ОКС определяется распространением ВУВ в воздушной среде и волн в грунте, воздействующими на ОКС на поверхности земли, а также являющиеся заглубленными или подземными. На рис. 2 показан состав зон формирования, движения и воздействия взрывной волны.

Взрывная волна в процессе распространения образует воздушную ударную волну с ударным импульсом в фазе сжатия, что и принято обозначать фронтом воздушной ударной волны, воздействующей на наземные объекты, а также волну сжатия в грунте, воздействующую на подземные или заглубленные сооружения, что было исследовано в том числе и А.Ю. Савенковым [12–14].

Показанная на рис. 2 схема ВУВ структурно будет состоять из 4 частей: наземной части здания, подземной части здания, грунтового массива и воздушной среды, в которой ВУВ, распространяясь, трансформируется в волну сжатия в грунте, с вариантом подземного сооружения встроенного типа. Однако на практике, в зависимости от заглубленности, они могут быть котлованного, наземно-обсыпного и подземного типов. Хотя следует признать, что наиболее часто ЗСГО являются подземной частью жилого, административного или производственного здания. Очень редкими являются случаи устройства ЗСГО в виде отдельно размещенных сооружений. Волновая картина, представленная на рис. 2, волна сжатия в грунте будет зависеть от давления во фронте волны сжатия, типа грунтов и заглубленности подземного сооружения.

Оценивая характер распространения ВУВ и ее взаимодействия с преградой, следует учитывать характер взрывного воздействия на защитные ограждающие конструкции. И особенно входы (выходы), которые после воздействия ВУВ может заклинить (расклинить), что не позволит их открыть и обеспечить эвакуацию людей. В этой связи более устойчивыми (защищенными) к воздействию ВУВ являются сквозниковые или открытые входы ЗСГО (рис. 3, *b*, *c*, *d*) по сравнению с тупиковыми входами (рис. 3, *a* или *e*).

Схема движения ВУВ является сложным процессом. Все виды волн, а также удар и контактный взрыв оказывают на ограждающие конструкции динамическое воздействие, в результате которого

конструктивные элементы находятся в сложном напряженно-деформированном состоянии, а сооружение в целом совершает сложное колебательное движение. Это движение характеризуется следующими кинематическими параметрами:

- перемещениями, скоростями и ускорениями сооружения в направлении трех координатных осей;
- углами, угловыми скоростями и ускорениями поворота сооружения вокруг трех координатных осей.

Величины этих параметров и характер изменения их во времени зависят от многих факторов, основными из которых являются:

- конструктивно-компоновочная форма сооружения, масса, условия посадки и гидрогеология;
- величина и характер динамических нагрузок;
- физико-механические свойства грунта, в котором расположено сооружение [15].

С точки зрения расчета параметров движения многообразии геологических разрезов, в которых располагаются сооружения, можно свести к трем наиболее характерным типам (рис. 4).

1. Мягкий однородный или слоистый грунт. Скальное основание залегает на больших глубинах (400...500 м) и не оказывает влияния на поле напряжений в верхних слоях (рис. 4, *a*, *b*).

2. Мягкий грунт на скальном основании, залегающем на небольших глубинах (50...150 м), или мягкий грунт с высоким горизонтом грунтовых вод, расположенных на глубине не менее 30 м (рис. 4, *c*).

3. Сплошной скальный массив (рис. 4, *d*).

При расположении сооружений в мощном слое мягкого грунта (п. 1, 2) основное воздействие оказывает воздушная ударная волна и порожденная ею волна сжатия, а в случаях расчета сооружений на давление $\Delta P_{\phi} > 2$ МПа и эпицентральные волны. При неглубоком залегании скального основания (п. 2) или наличии водоносного пласта мощностью более 10 м наряду с волнами сжатия на параметры движения сооружения существенное влияние оказывают сейсмические и отраженные волны [16, 17].

При расположении сооружения в скальных грунтах доминирующее значение приобретают сейсмические волны. Колебания же сооружения от воздушной ударной волны и волны сжатия, в связи с малостью их по сравнению с колебаниями от сейсмических волн, можно не учитывать.

Расчет параметров движения сооружения в строгой постановке, т.е. с учетом объемной деформации грунтовой среды с нелинейной зависимостью $\sigma - \epsilon$ деформации сооружения и его конструктивных элементов, представляет собой сложную математическую модель, которую на практике упрощают до требуемого уровня.

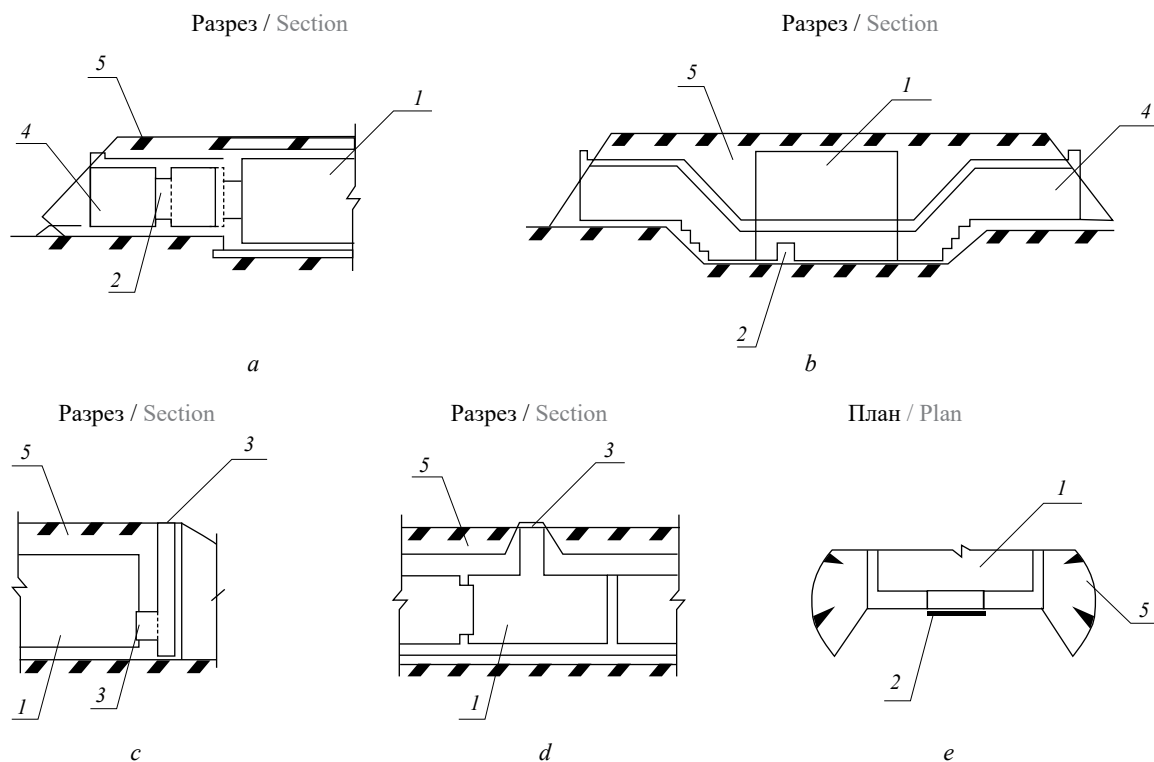


Рис. 3. Типы основных и аварийных входов (выходов) защитных сооружений ГО и ЧС: *a* — тупиковый; *b* — сквозниковый; *c* — шахтный; *d* — вертикальный встроенный; *e* — прямой открытый; *1* — внутренний объем защищенного сооружения; *2* — двери на входах; *3* — люки на аварийных выходах; *4* — входная потерна (подземный коридор); *5* — грунтовая обсыпка над защищенным сооружением

Fig. 3. Types of main and emergency entrances (exits) of civil defense and emergency protection structures: *a* — dead-end; *b* — through; *c* — shaft; *d* — vertical built-in; *e* — direct open; *1* — the internal volume of the protected structure; *2* — doors at the entrances; *3* — hatches at the emergency exits; *4* — entrance tunnel (underground corridor); *5* — soil sprinkling above the protected structure

Важно учитывать местное воздействия взрыва, под которым понимают образование воронки, зон разрушения в грунте, вспучивания, навала грунта и камнепада. При наземных взрывах в грунте образуется воронка взрыва за счет вдавливания его в массив, выдавливания в стороны в радиальном и вертикальном направлениях, а также вследствие выброса части грунта из воронки (рис. 5). Выдавленный и выброшенный из воронки грунт образует зону навала (завала), которая может образоваться и при разрушении здания.

Основными параметрами воронки взрыва являются (рис. 5):

- радиус воронки r_B ;
- глубина воронки h_B ;
- высота навала, выброшенного из воронки грунта, h_H ;
- вертикальное ω_z и горизонтальное ω_x остаточные смещения;
- радиус навала грунта r_H .

Непосредственно за воронкой образуется зона разрушений грунта, в которой грунт пронизан трещинами в основном в радиальном направлении.

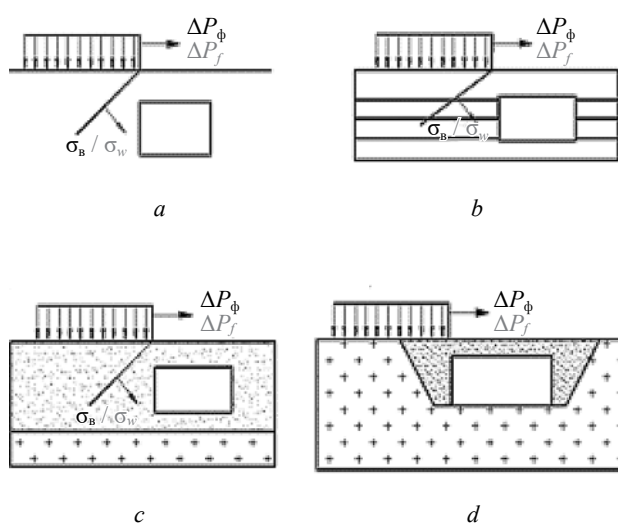


Рис. 4. Основные схемы расположения сооружения в грунте с различными сейсмогеологическими разрезами: *a* — в мягком однородном грунте; *b* — в мягком слоистом грунте; *c* — в мягком грунте, подстилаемом скалой; *d* — в скальном грунте

Fig. 4. Basic diagrams of the structure's location in the ground with various seismogeological sections: *a* — in soft homogeneous soil; *b* — in soft layered soil; *c* — in soft soil underlain by rock; *d* — in rocky soil

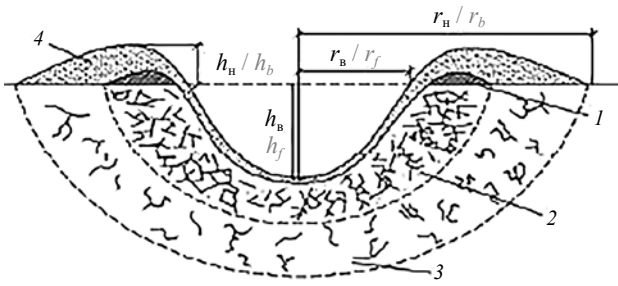


Рис. 5. Профиль воронки взрыва: 1 — выдавленный грунт; 2 — зона разрушения; 3 — зона упруго-пластических деформаций; 4 — навал грунта

Fig. 5. The profile of the explosion funnel: 1 — the extruded soil; 2 — the destruction zone; 3 — zone of elastic-plastic deformations; 4 — bulk of soil

Радиус и глубина воронки наземного ядерного взрыва приведены в табл. 3.

Сейсмозрывные волны в грунтовых массивах [18, 19] при наземных взрывах возникают вследствие концентрированной передачи энергии грунту в районе взрыва или воздействия на грунт воздушной ударной волны. Взрывное воздействие на здания и сооружения в виде местного действия ВУВ и сейсмозрывных волн взрыва может привести к повреждениям наземных и подземных объектов (рис. 6).

Местное действие приводит к тому, что наземные сооружения, а также наземные элементы объектов, находящиеся в грунтовом массиве (например, входы в ЗСГО, оголовки их газовоздушных трактов), могут быть засыпаны навалом грунта воронки взрыва. Вспучивание и растрескивание поверхности грунта могут выводить из строя дороги, взлетно-посадочные полосы аэродромов, кабельные линии, трубопроводы, а также другие объекты. Местность становится труднопроходимой для транспортных средств. Попадание зданий и сооружений в зону воронки приводит к наиболее сильному или полному их разрушению [20–22].

Сейсмозрывные волны, воздействуя на сооружения, находящиеся в массиве грунта, будут вызывать в их конструкциях запредельные нагрузки и усилия, вовлекать все сооружение в колебательное движение, смещая его относительно окружающего грунта, результатом чего являются остаточные относительные смещения (рис. 7, 1). Изгибающие моменты и перерезывающие силы могут приводить к разрушениям конструкций сооружений (рис. 7, 2) [19].

При колебательном движении сооружения возникают ускорения, под действием которых появляются инерционные силы F_ϕ . Эти силы могут быть столь велики, что могут привести к поражению людей, срыву со своих мест и повреждению оборудования и аппаратуры внутри ЗСГО (рис. 7, 3, 4). Оборудование и аппаратура могут выйти из строя и без срыва со своих мест за счет внутренних

Таблица 3. Радиус и глубина воронки наземного ядерного взрыва

Table 3. Radius and depth of a ground-based nuclear explosion crater

Параметр Parameter	Мощность взрыва q , т Explosion power q , t		
	10^4	10^5	10^6
r_b , м r_f , m	30/25	60/50	120/100
h_b , м h_f , m	14/10	25/20	45/36

Примечание. В числителе указано для дисперсных грунтов, в знаменателе — для скальных.

Note. The numerator indicates dispersed soils, and the denominator indicates rocky soils.

повреждений. Травмы у людей могут возникать и за счет потери ими устойчивости при общем перемещении сооружения. Потеряв равновесие, человек может упасть, удариться о находящиеся в помещении предметы и ограждающие конструкции.

Смещение сооружения относительно окружающего грунта может привести к разрушению входов, заклиниванию дверей, обрыву и разрушению подводящих сетей водоснабжения, электроснабжения, связи, канализации и технологических коммуникаций (рис. 7, 5).

Абсолютные смещения, разрушение и развороты сооружения (рис. 8) относительно своего первоначального положения могут привести к повреждениям входов (входных потерн) и невозможности выхода (прохода) людей.

Конкретное значение напряжения на определенном удалении от центра взрыва зависит от мощности взрыва, расстояния до взрыва и свойств грунтового массива, важнейшими из которых являются плотность грунта и скорости распространения упругих и упругопластических волн.

Как и следует из схем на рис. 2 и рис. 8 [12], при соответствующих значениях избыточного давления ΔP_ϕ во фронте ВУВ (табл. 4, столбец 4) будут силь-

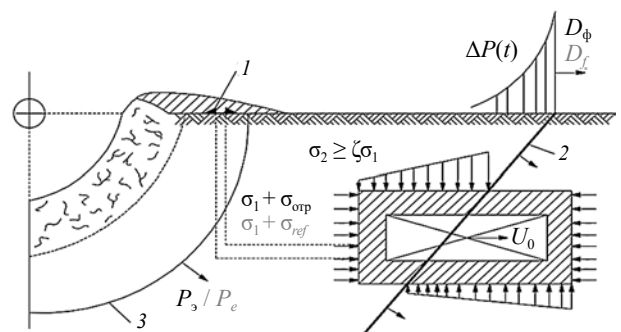


Рис. 6. Схема воздействия на сооружение местного действия взрыва и сейсмозрывных волн: 1 — оголовок входа (газовоздушного тракта); 2 — волна сжатия; 3 — эпицентральная волна

Fig. 6. Scheme of the impact of a local explosion and seismic waves on the structure: 1 — the head of the entrance (gas-air path); 2 — compression wave; 3 — epicentral wave

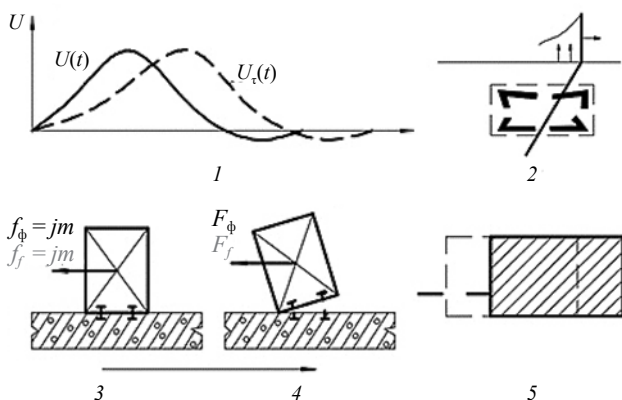


Рис. 7. Сейсмозрывное воздействие на подземные сооружения и возможные последствия
Fig. 7. Seismic and explosive effects on underground structures and possible consequences

ные разрушения, т.е. (табл. 5, столбец 4) сплошные разрушения несущих конструкций наземных зданий и подземных сооружений.

При сильных разрушениях могут сохраняться наиболее прочные элементы здания и сооружения: элементы каркасов, ядра жесткости, частично стены и перекрытия нижних этажей, но за счет менее прочных конструкций и узлов образуются завалы. Для производственных зданий это наступает при ΔP_ϕ во фронте ВУВ = 65–95 кПа (табл. 4, столбец 4). Для надземной части «жилых и административных» при ΔP_ϕ = 20–80 кПа. Для подвалов сильные разрушения наступят от ΔP_ϕ = 160 кПа.

Самой высокой степенью защищенности обладают защитные сооружения (табл. 4, столбец 3), где сильные разрушения наступают в интервале значений ΔP_ϕ = 160–1200 кПа. Причем надо понимать, что разрушения наступают не сразу после воздействия фронта ВУВ на ЗСГО, а после прохождения всего цикла фаз «сжатия – разряжения». Кроме того, следует понимать, что в случае воздействия ВУВ с ΔP_ϕ превышающими значениями для степени разрушения «сильная» наступает еще более критичное техническое состояние сооружения со степенью разрушения «полная» (табл. 5, столбец 4), которая

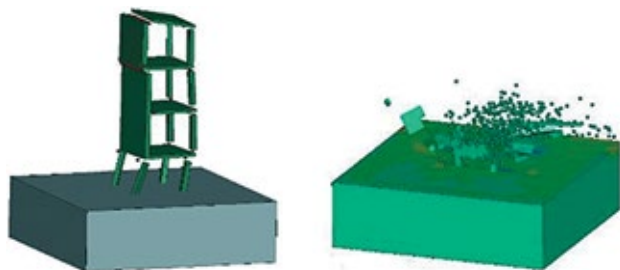


Рис. 8. Поэлементная расчетная динамическая модель цикла «обрушение здания – образование завала над защитным сооружением»
Fig. 8. Piecemeal computational dynamic model of the cycle “building collapse – blockage formation on a protective structure”

характеризуется обрушением здания и сооружения с образованием завалов, с сохранением только незначительной части прочных элементов.

Таким образом, гарантировано при сильных и полных разрушениях в случае со связанными в единую систему «надземная часть здания – ЗСГО» заглубленное сооружение под завалом в связи с обрушением на него строительных конструкций. При этом, чем больше площадь застройки и высота здания, масштабы завалов будут ощутимее.

Сценарные варианты повреждений и оценка технического состояния строительных ограждающих конструкций зданий после взрывного воздействия приведены в табл. 6. Укрупненно их можно сформировать в 5 групп. Первые четыре после воздействия обычных средств поражения на основания и фундаменты, перекрытия, стены, кровлю, и пятая группа — как результат воздействия ВУВ после взрыва ядерного заряда.

В качестве нормативного оценочного источника, определяющего категорию технического состояния, принят ГОСТ 31937–2024⁸, в соответствии с которым ключевыми характеристиками являются: 1-я категория — нормативное (дефекты отсутствуют, все параметры строительных конструкций соответствуют требованиям); 2-я категория — работоспособное (дефекты имеются, но несущая способность обеспечена); 3-я категория — ограниченно-работоспособное (снижена несущая способность грунтов и конструкций, опасности обрушения нет); 4-я категория — аварийное (дефекты значительны, несущая способность исчерпана, опасность обрушения). В табл. 6 оценочные категории технического состояния приведены в столбце 5.

Планируя общие мероприятия защиты от взрывного воздействия на заглубленные и подземные защитные сооружения ГО, эффективными следует считать [5, 11, 19]:

- амортизация всего внутреннего объема сооружения (общая амортизация) либо отдельных его частей или отдельного, наиболее чувствительного к ускорениям оборудования и аппаратуры (местная амортизация);
- рассредоточение сооружений и объектов для исключения их взаимного поражения;
- заглубление сооружений в грунт;
- выбор соответствующих геологических условий посадки сооружения, обеспечивающих наибольшее затухание тех параметров сейсмозрывных волн, к которым сооружение наиболее чувствительно;
- проектирование и строительство ограждающих конструкций сооружений, способных выдерживать расчетные воздействия сейсмозрывных волн, не разрушаясь;

Таблица 4. Степени разрушения ОКС при различных значениях избыточного давления во фронте, кПа⁸
Table 4. Degrees of destruction of the CCF at different values of overpressure in the front of the, kPa⁸

Типы зданий Types of buildings	Степени разрушения объекта при различных значениях ΔP_f , кПа The degree of destruction of the object at different values of ΔP_f , kPa		
	Слабая Weak	Средняя Average	Сильная Strong
1	2	3	4
<i>1. Промышленные здания Industrial buildings</i>			
Промышленное с металлическим или железобетонным каркасом Industrial with metal or reinforced concrete frame	32–65	65–80	80–95
Промышленное с металлическим каркасом и крановым оборудованием Industrial with metal frame and crane equipment	32–48	48–65	65–80
<i>2. Жилые и административные здания Residential and administrative buildings</i>			
Кирпичное многоэтажное Brick multi-storey building	12–20	20–32	32–48
Кирпичное одно- и двухэтажное One- and two-story brick buildings	12–24	24–40	40–56
<i>3. Защитные сооружения Protective structures</i>			
Убежище отдельно стоящее, рассчитанное на: The shelter is free-standing, designed for:	–	–	–
350 кПа (3,5 кгс/см ²) 350 kPa (3.5 kgf/cm ²)	640–960	960–1200	1200
100 кПа (1 кгс/см ²) 100 kPa (1 kgf/cm ²)	160–240	240–320	320
Убежище встроенное, рассчитанное на: The shelter is built-in, designed for:	–	–	–
100 кПа (1 кгс/см ²) 100 kPa (1 kgf/cm ²)	110–160	160–240	240
50 кПа (0,5 кгс/см ²) 50 kPa (0.5 kgf/cm ²)	48–65	65–160	160

- увеличение стойкости внутреннего оборудования и аппаратуры к воздействию ускорений;
- устройство гибких вводов и компенсаторов на подходящих коммуникациях;
- дублирование отдельных элементов сооружения.

Необходимо отметить, что только комплексное проведение всех мероприятий защиты позволяет строить сооружения, отвечающие предъявляемым к ним требованиям.

⁸ ГОСТ 31937–2024. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.

Проведенный анализ (табл. 4–6) позволяет отметить, что степень повреждения ОКС для всех видов источников взрыва и боеприпасов (в обычном и в ядерном исполнении) определяется техническими характеристиками б/п, мощностью взрыва, расстоянием до места взрыва, местоположением взрыва (наземный, подземный, воздушный), конструктивных особенностей здания и наличием преград (экранов).

При этом, исходя из потенциальной возможности повреждения зданий и сооружений, далее предлагается методика планирования аварийно-восстановительных работ (АВР) и их ресурсного обеспечения на поврежденном объекте. Эффективность

Таблица 5. Характеристика степеней разрушения зданий от действия воздушной ударной волны⁹
Table 5. Characteristics of the degrees of destruction of buildings from the action of an air shock wave⁹

Степень разрушения Degree of destruction			
Слабая Weak	Средняя Average	Сильная Strong	Полная Full
1	2	3	4
<p>Разрушение внутренних перегородок, кровли, дверных и оконных коробок, легких пристроек и др. Основные несущие конструкции сохраняются</p> <p>Destruction of internal partitions, roofs, door and window frames, light outbuildings, etc. The main supporting structures are preserved</p>	<p>Снижение эксплуатационной пригодности зданий. Несущие конструкции сохраняются, но частично деформируются. Снижается несущая способность конструкций. Обрушений нет</p> <p>Reducing the operational suitability of buildings. The supporting structures are preserved, but partially deformed. The bearing capacity of structures is reduced. There are no collapses</p>	<p>Сплошное разрушение несущих конструкций. Могут сохраняться наиболее прочные элементы: элементы каркасов, ядра жесткости, частично стены и перекрытия нижних этажей. При сильном разрушении образуется завал</p> <p>The continuous destruction of load-bearing structures. The most durable elements can be preserved: elements of frames, cores of rigidity, partially walls and floors of the lower floors. In case of severe destruction, a blockage is formed</p>	<p>Обрушение зданий. Могут сохраниться только поврежденные (или неповрежденные) подвалы, а также незначительная часть прочных элементов. Образуются завалы</p> <p>The collapse of buildings. Only damaged (or undamaged) basements can be preserved, as well as a small part of the durable elements. Blockages are forming</p>

АВР и их ресурсное обеспечение являются взаимосвязанными и важными элементами обеспечения организационно-технологической надежности (ОТН) восстановления, так как прямо влияют на сроки, затраты и качество работ [23]. Блок-схема указанного представлена на рис. 9.

Базовым элементом системы планирования ресурсов является уточнение агрегированных параметров производственных процессов: трудоемкости, выработки, расхода ресурсов, себестоимости и стоимости работ, по сформированным базовым конструктивно-технологическим решениям восстановления объекта [24].

Аналитическое решение задачи определения потребностей в восстановительных объектах позволяет определить и оптимизировать параметры производственных процессов в агрегированном виде.

При расчете обеспечения средств механизации восстановительных работ использована статистическая модель ресурсного обеспечения [25]. С учетом этого стационарные, ординарные потоки с ограниченным последствием однозначно определяются функцией плотности вероятностей.

При этом интервал времени t_i между поступлением $(i - 1)$ и i заявки, то при $i \geq 2$ все t_i распределены одинаково с функцией плотности вероятностей $f(t)$. Плотность вероятностей случайной

величины t_i (момента поступления первой заявки) возможно определить по формуле (1):

$$f_i(Z) = \lambda[1 - F(Z)], \tag{1}$$

где λ — интенсивность потока заявок на ресурсы;

$$F(Z) = \int_0^Z f(t) dt \text{ — функция распределения интервалов между заявками.}$$



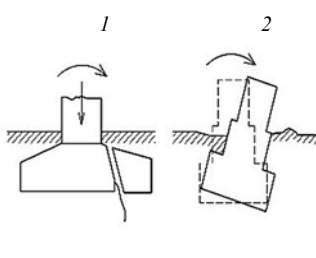
Входящий поток требований целесообразно задать в виде интегральной функции распределения интервалов между поступлением двух последовательных ресурсных заявок:

$$F(t_i) = P(t_i \leq Z) = \begin{cases} \int_0^Z f(\omega) d\omega & \text{при } i \geq 2 \\ \int_0^Z f_1(\omega) d\omega & \text{при } i = 1 \end{cases} \tag{2}$$

Исходя из вышеприведенного целесообразно вероятностную характеристику системы ресурсного обеспечения представить в виде системы функционирования обслуживаемых объектов с учетом единиц расхода ресурсов и задать функцией распределения длительности обслуживания объектов поставки ресурсов $\Phi(t_{\text{обсл}}) = P(t_{\text{обсл}} \leq x)$.




В величину времени обслуживания в условиях АВР целесообразно включать все затраты материальных, финансовых и временных ресурсов, связанных с потерями из-за нарушения эффективности АВР ввиду ограниченности времени на качественную

Таблица 6. Варианты и оценка сценарных повреждений строительных конструкций зданий от взрывного воздействия
Table 6. Variants of damage to building structures from explosive effects

Шифр дефекта The cipher of the defect	Вид повреждения Type of damage	Фотофиксация сценарного повреждения Photofixation of scenario damage	Оценочная категория технического состояния объекта (ГОСТ 31937–2024) ⁸ Estimated category of the technical condition of the facility (GOST 31937–2024) ⁸
2	3	4	5
1.1	<p>Зоны повреждения для скальных пород: воронки; смятия; трещинообразования; микротрещины Damage zones for rock formations: funnels; crumpling; cracking; microcracks</p>		<p>Для оснований категория не предусмотрена There is no category for grounds</p>
1.2	<p>Зоны повреждения для грунтовых пород: воронки; выдавливания; разрушения; упруго пластические деформации; навал Damage zones for ground rocks: funnels; extrusions; destruction; elastic plastic deformations; bulk</p>		<p>Для оснований категория не предусмотрена There is no category for grounds</p>
1.3	<p>Одновременное повреждение основания и здания Simultaneous damage to the foundation and building</p>		<p>Для фундаментов 3, 4 For foundations 3, 4</p>
1.4	<p>Возможные дефекты фундаментов при отсутствии прямого воздействия на фундамент, но воздействии на грунтовое основание: разрушение; повреждение Possible defects of the foundations in the absence of direct impact on the foundation, but impact on the ground foundation: destruction; damage</p>		4
1.5	<p>Разрушение или повреждение фундамента при прямом воздействии Destruction or damage of the foundation by direct impact</p>		4

Шифр дефекта The cipher of the defect	Вид повреждения Type of damage	Фотофиксация сценарного повреждения Photofixation of scenario damage	Оценочная категория технического состояния объекта (ГОСТ 31937–2024) ⁸ Estimated category of the technical condition of the facility (GOST 31937–2024) ⁸
2	3	4	5
2.1	Локальное повреждение Local damage		4
2.2	Разрушение Destruction		4
3.1	Повреждение стен и оконных конструкций от взрывной волны Damage to walls and window structures from the blast wave		2–3
3.2	Повреждение стен продуктами взрыва Damage to the walls by explosion products		2–3
3.3	Местное повреждение стен из мелкогазобетонных элементов (взрывное воздействие снаружи) Local damage to walls made of small-sized elements (explosive impact from the outside)		3–4
3.4	Местное повреждение стен здания из мелкогазобетонных элементов (взрывное воздействие внутри) Local damage to the walls of a building made of small-sized elements (explosive impact inside)		3–4
3.5	Повреждение стен панельного здания (воздействие внутри) Damage to the walls of a panel building (impact inside)		3–4

Шифр дефекта The cipher of the defect	Вид повреждения Type of damage	Фотофиксация сценарного повреждения Photofixation of scenario damage	Оценочная категория технического состояния объекта (ГОСТ 31937–2024) ⁸ Estimated category of the technical condition of the facility (GOST 31937–2024) ⁸
2	3	4	5
3.6	Повреждение стен панельного здания (воздействие снаружи) Damage to the walls of a panel building (external impact)		3–4
3.7	Разрушение части здания (секции, блока) Damage to the walls of a panel building (external impact)		4
3.8	Полное разрушение здания при внешнем взрывном воздействии Complete destruction of the building due to external explosive impact		Здание разрушено, требуется снос и вывоз строительного мусора The building is destroyed, requires demolition and removal of construction debris
3.9	Полное разрушение здания при размещении источника взрыва внутри здания Complete destruction of the building when the source of the explosion is located inside the building		Здание разрушено, требуется снос и вывоз строительного мусора The building is destroyed, requires demolition and removal of construction debris
3.10	Полное разрушение комплекса зданий Complete destruction of the building complex		Здания разрушены, требуется снос и вывоз строительного мусора The building is destroyed, requires demolition and removal of construction debris

Шифр дефекта The cipher of the defect	Вид повреждения Type of damage	Фотофиксация сценарного повреждения Photofixation of scenario damage	Оценочная категория технического состояния объекта (ГОСТ 31937–2024) ⁸ Estimated category of the technical condition of the facility (GOST 31937–2024) ⁸
2	3	4	5
4.1	Повреждение или разрушение кровли Roof damage or destruction		4
4.2	Комбинированное повреждение кровли и стен Combined damage to the roof and walls		4
5.1	Повреждение или разрушение объекта после взрыва ядерного заряда в зависимости от мощности и расстояния до взрыва Damage or destruction of an object after the explosion of a nuclear charge, depending on the power and distance to the explosion		3, 4 или разрушено 3, 4 or destroyed

проработку и обоснование всех организационно-технологических решений (ОТР), возможными логистическими проблемами ввиду только сформированных каналов поставки, в ряде случаев экстремальных природно-климатических условий, непредвиденных и некоторых других организационно-технологических и технических причин.

Планирование средств механизации (СМ) следует предусматривать исходя из необходимости требуемого ремонта и профилактического обслуживания в соответствии с регламентами и заданными графиками для каждого СМ после окончания восстановления очередного объекта и нахождения в ремонте некоторое время $t_{рем}$, характеризующегося функцией распределения $G(t_{рем}) = P(t_{рем} \leq y)$ до начала работ на следующем объекте [26].

В условиях отсутствия необходимых средств механизации и ожидания на объекте СМ некоторое время $t_{ож}$ длительность ожидания будет величиной случайной со своей функцией распределения:

$$H(t_{ож}) = P(t_{ож} \leq \omega). \tag{3}$$

В такой ситуации необеспеченности СМ следует предусмотреть динамическую корректировку составленного ранее плана работ и выполнить резервные работы. Таким образом, моделируя систему массового обслуживания, в условиях рисков, следует формировать случайные интервальные величины между поступлениями заявок от объектов, определять длительности обслуживания объектов и простоя средств механизации в ремонте или непоступления ресурсов, что отражается заданным законом распределения $F(x)$, заключающимся в получении значения x из уравнения:

$$x = F^{-1}(\xi), \tag{4}$$

где $F^{-1}(\xi)$ — функция, обратная $F(x)$; ξ — случайное число из совокупности с равномерным распределением в интервале $(0 \dots 1)$.

Таким образом, в таких экстремальных условиях оптимальным решением эффективности выполне-

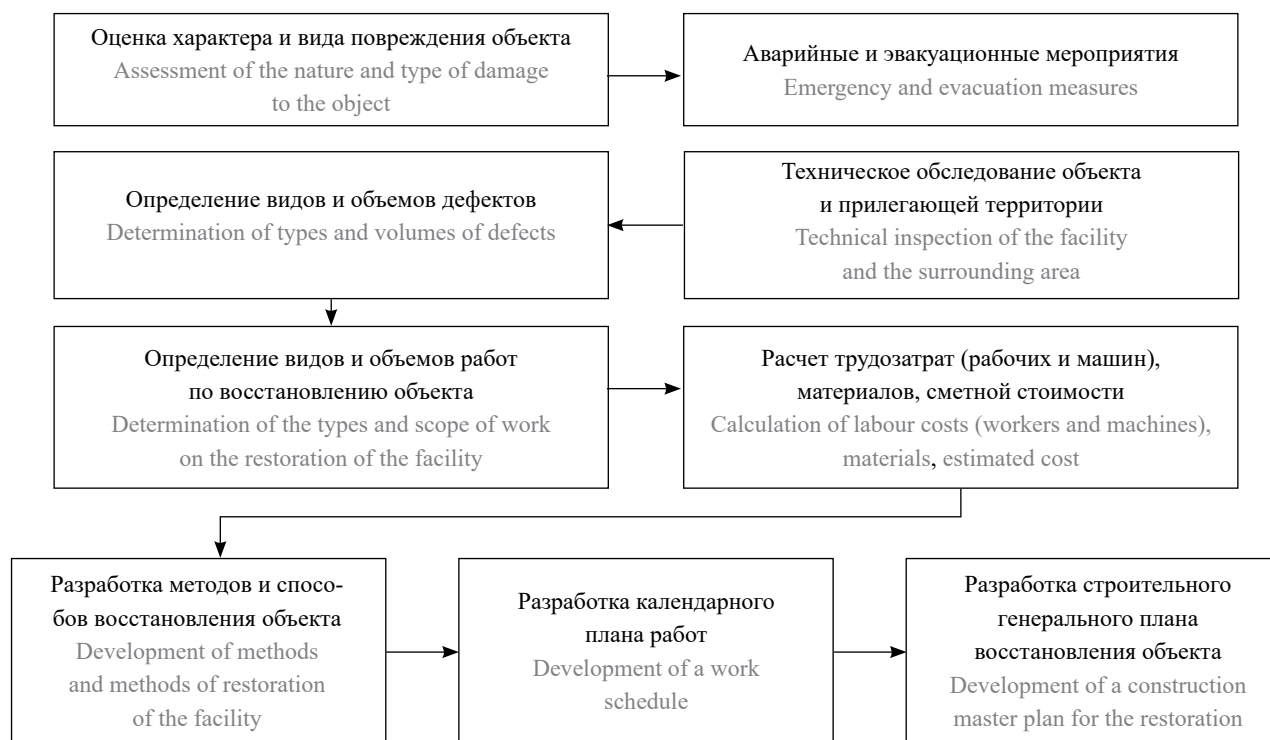


Рис. 9. Блок-схема методики планирования аварийно-восстановительных работ и их ресурсного обеспечения
Fig. 9. Flowchart of the methodology for planning emergency recovery operations and their resource provision

ния работ может стать применение динамической, детерминированной модели планирования работ и их ресурсного обеспечения.

Выводы

Проведенное исследование позволяет отметить следующее.

1. Степень повреждения ОКС для всех видов и источников взрыва определяется техническими характеристиками взрывчатого вещества, мощностью взрыва, расстоянием до места взрыва, местоположением взрыва (наземный, подземный, воздушный), конструктивными особенностями зданий и сооружений, наличием преград (экранов).

2. Гарантировано будут разрушены наземные объекты независимо от их сейсмостойкости: жилые и административные здания при значениях избыточного давления во фронте ВУВ 32–80 кПа, а производственные здания при значениях 65–95 кПа. В этом случае будут образованы сильные разрушения и здания будут в категории технического состояния — аварийное, вследствие чего проведение аварийно- и ремонтно-восстановительных работ делается технически и экономически нецелесообразным.

3. Следует предусматривать опасные условия воздействия на ОКС ударной волны. Оценка состояния входов после воздействия ВУВ дает основание считать, что есть опасность расклинивания (заклинивания) дверей входов (выходов)

из сооружений. В этой связи более опасным является направление прямого волнового воздействия на конструкции входов ЗСГО. Наибольшую степень защищенности при воздействии ВУВ будут иметь сквозниковые входы, в отличие от тупиковых, шахтных и прямых открытых. В этой связи при проектировании входов наиболее целесообразными вариантами являются сквозниковые, что повысит живучесть и эвакуационные параметры сооружения, минимизирует опасность расклинивания дверей.

4. В случае если ЗСГО является подземной частью наземного здания, то при разрушении наземной части взрывом существует высокая вероятность, что эвакуировать людей из ЗСГО не представится возможным в связи с образованием завалов и заклиниванием дверей. В этом случае потребуются аварийно-восстановительные работы для расчистки эвакуационных путей и восстановления входов (выходов) для прохода людей.

5. Особые условия аварийно-восстановительных работ, ввиду ограниченности времени, возможных рисков обрушений, необходимости эвакуационных работ, новизны логистических схем обеспечения всеми видами ресурсов и некоторыми другими проблемами, логично предполагают использование динамической, детерминированной моделей планирования работ и их ресурсного обеспечения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Болодьян И.А., Вогман Л.П., Корольченко Д.А.* Экспериментально-аналитические исследования пожарной опасности материалов, применяемых в оборудовании с обогащенными кислородом средами при повышенных давлениях, и пути снижения их горючести // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2023. № 32 (3). С. 17–30. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.03.17-30. EDN FOZJMS.
2. *Орлов Г.Г., Корольченко Д.А., Корольченко А.Я.* Определение величины и характера взрывных нагрузок при применении инерционных предохранительных конструкций // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2015. № 24 (4). С. 47–55. EDN TVFFSB.
3. *Stroykov G.A., Babyr N.V., Ilin I.V., Marchenko R.S.* System of comprehensive assessment of project risks in energy industry // *International Journal of Engineering, Transaction A: Basics*. 2021. No. 34 (7). DOI: 10.5829/IJE.2021.34.07A.22. EDN DZMCQN.
4. *Srikrishnan V., Lafferty D.C., Wong T.E., Lamontagne J.R., Quinn J.D., Sharma S. et al.* Uncertainty Analysis in Multi-Sector Systems: Considerations for Risk Analysis, Projection, and Planning for Complex Systems // *Earth's Future*. 2022. № 10 (8). DOI: 10.1029/2021EF002644. EDN CJZDWL.
5. *Арефьева Е.В., Баринов А.В., Бобарико А.В., Борейко В.Я., Виноградов О.В.* Защита в чрезвычайных ситуациях // МЧС России. Изд. 2-е перераб. М. : АГЗ МЧС России, 2018. 400 с. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_009934396/
6. *Боеприпасы : уч., в 2 т. / под общ. ред. В.В. Селиванова.* 3-е изд. М. : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. 346 с.
7. *Котляревский В.А.* Прочность и защитные свойства специальных сооружений: методы расчета и программные средства. Магнитогорск : ООО «ВЕЛД», 2014. 86 с. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_007871487/
8. *Мишуев А.В.* Воздушная ударная волна в сооружениях. М. : Библиотека научных разработок и проектов НИУ МГСУ, 2015. 408 с. EDN XCXUIX.
9. *Baloshin Yu.A., Zarichnyak Yu.P., Uspenskaya M.V.* Physical foundations of nuclear energy : textbook. Part II. St. Petersburg : ITMO University, 2015. 88 p.
10. *Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П., Кулеш Д., Стрелов Р.* Взрывные явления. Оценка последствий. В 2-х кн. Кн. 2 / пер. с англ. под ред. Я.Б. Зельдовича, Б.Е. Гельфанда. М. : Мир, 1986. 382 с. URL: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_rc_621191/
11. *Мкртычев О.В.* Безопасность зданий и сооружений при сейсмических и аварийных воздействиях : монография. М. : МГСУ, 2010. 152 с. EDN RXGPIZ.
12. *Савенков А.Ю.* Расчет подземных железобетонных сооружений на аварийные воздействия в нелинейной динамической постановке : дис. ... канд. техн. наук. М. : МГСУ, 2023. 143 с. EDN WPWNCH.
13. *Комаров А.А., Громов Н.В., Корольченко А.Д.* Использование сетчатых экранов для защиты промышленных объектов от беспилотных летательных аппаратов // *Безопасность труда в промышленности*. 2025. № 1. С. 76–82. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-1-76-82. EDN FQFAKL.
14. *Ramalho F.D., Silva I.S., Ekel P.Y., Martins C.A.P. da S., Bernardes P., Libório M.P.* Multimethod to prioritize projects evaluated in different formats // *MethodsX*. 2021. No. 8. P. 101371. DOI: 10.1016/j.mex.2021.101371. EDN BJGJAK.
15. *Podolchak N., Tsygulyk N., Dziurakh Y.* Building an effective personnel risks management system of the organization // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. No. 4 (13–118). Pp. 44–52. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.262547. EDN AAOUFS.
16. *Niazi M.A.* Introduction to the modeling and analysis of complex systems : a review // *Complex Adaptive Systems Modeling*. 2016. No. 4 (1). Pp. 1–3. DOI: 10.1186/s40294-016-0015-x. EDN ANLFGU.
17. *Mbuli N., Mathonsi M., Seitshiro M., Pretorius Ja.H.C.* Decomposition forecasting methods : a review of applications in power systems // *Energy Reports*. 2020. No. 6. Pp. 298–306. DOI: 10.1016/j.egy.2020.11.238. EDN WKEWFM.
18. *Ластовкин В.Ф., Козлов А.П., Забелин В.А.* Защитные сооружения гражданской обороны. Нижний Новгород : ННГАСУ, 2020. 79 с. URL: https://bibl.nngasu.ru/electronicresources/uch-metod/health_safety/873922.pdf
19. *Руденко А.А.* Организационно-технологические и конструктивные решения по восстановлению, ремонту, усилению и замене поврежденных элементов зданий : монография. Курск : Университетская книга, 2025. 74 с. EDN QPBWEW.
20. *Hernández-Orozco S., Zenil H., Riedel J., Uccello A., Kiani N.A., Tegnér J.* Algorithmic Probability-Guided Machine Learning on Non-Differentiable Spaces // *Frontiers in Artificial Intelligence*. 2021. No. 3. P. 20. DOI: 10.3389/frai.2020.567356. EDN BSPNPV.
21. *Ghosh S., Zaboli A., Hong Ju., Kwon Ja.* An Integrated Approach of Threat Analysis for Autonomous Vehicles Perception System // *IEEE Access*. 2023. No. 11. Pp. 14752–14777. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3243906. EDN UPQVKP.

22. Мухно Е.П. Ликвидация последствий аварий и стихийных бедствий. М. : Атомиздат, 1989. 287 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007653694>
23. Dvulit P., Savchuk S., Sosonka I. Accuracy estimation of site coordinates derived from GNSS-observations by non-classical error theory of measurements // *Geodesy and Geodynamics*. 2021. No. 12 (5). Pp. 347–355. DOI: 10.1016/j.geog.2021.07.005. EDN VTENPR.
24. Angermeier D., Wester H., Beilke K., Hansch G., Eichler J. Security risk assessments: modeling and risk level propagation // *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*. 2023. No. 7 (1). 25 p. DOI: 10.1145/3569458
25. Alamdari A.M., Jabarzadeh Y., Adams B., Samson D., Khanmohammadi S. An analytic network process model to prioritize supply chain risks in green residential megaprojects // *Operations Management Research*. 2022. No. 16 (9). Pp. 1–23. DOI: 10.1007/s12063-022-00288-2. EDN UOWIHH.
26. Bjerga T., Aven T., Zio E. Uncertainty treatment in risk analysis of complex systems: The cases of STAMP and FRAM // *Reliability Engineering and System Safety*. 2016. No. 156 (1). Pp. 203–209. DOI: 10.1016/j.res.2016.08.004

REFERENCES

1. Bolodyan I.A., Vogman L.P., Korolchenko D.A. Experimental and analytical studies of the fire hazard of materials used in equipment with oxygen-enriched media and ways to reduce their flammability. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 3(32):17-30. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.03.17-30. EDN FOZJMS. (rus).
2. Orlov G.G., Korolchenko D.A., Korolchenko A.Y. Determination of the value and character of the explosive loads in case of using of the inertial safety construction. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2015; 4(24):47-55. EDN TVFFSB. (rus).
3. Stroykov G.A., Babyr N.V., Ilin I.V., Marchenko R.S. System of comprehensive assessment of project risks in energy industry. *International Journal of Engineering, Transaction A: Basics*. 2021; 34(7):1778-1784. DOI: 10.5829/IJE.2021.34.07A.22. EDN DZMCQN.
4. Srikrishnan V., Lafferty D.C., Wong T.E., Lamontagne J.R., Quinn J.D., Sharma S. et al. Uncertainty Analysis in Multi-Sector Systems: Considerations for Risk Analysis, Projection, and Planning for Complex Systems. *Earth's Future*. 2022; 10(8). DOI: 10.1029/2021EF002644. EDN CJZDWL.
5. Arefyeva E.V., Barinov A.V., Bobariko A.V., Boreiko V.Ya., Vinogradov O.V. Protection in emergency situations. *EMERCOM of Russia. 2nd revised edition*. Moscow, AGZ EMERCOM of Russia, 2018; 400. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_009934396/ (rus).
6. Ammunition : *Study Guide, in 2 vol.* / ed. by V.V. Selivanov. 3rd Edition. Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 2019; 346.
7. Kotlyarevskiy V.A. *Strength and protective properties of special structures: calculation methods and software*. Magnitogorsk, LLC “VELD”, 2014; 86. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_007871487 (rus).
8. Mishuev A.V. *Air shock wave in structures*. Moscow, Library of Scientific developments and Projects of the National Research University MGSU, 2015; 408. EDN XCXUIX. (rus).
9. Baloshin Yu.A., Zarichnyak Yu.P., Uspenskaya M.V. Physical foundations of nuclear energy : *textbook*. Part II. St. Petersburg, ITMO University, 2015; 88.
10. Baker W., Cox P., Western P., Kulesh D., Strelow R. *Explosive phenomena. Assessment of consequences*. In 2 books. Book 2 / transl. from English ed. by Ya.B. Zeldovich, B.E. Gelfand. Moscow, Mir, 1986; 382. URL: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_rc_621191/ (rus).
11. Mkrtychev O.V. Safety of buildings and structures under seismic and emergency impacts : *monograph*. Moscow, MGSU, 2010; 152. EDN RXGPIZ. (rus).
12. Savenkov A.Yu. Calculation of underground reinforced concrete structures for emergency impacts in a non-linear dynamic formulation : *dissertation of the candidate of technical Sciences*. Moscow, MGSU, 2023; 143. EDN WPWNCH. (rus).
13. Komarov A.A., Gromov N.V., Korolchenko A.D. The use of mesh screens to protect industrial facilities from unmanned aerial vehicles. *Occupational safety in industry*. 2025; 1:76-82. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-1-76-82. EDN FQFAKL. (rus).
14. Ramalho F.D., Silva I.S., Ekel P.Y., Martins C.A.P. da S., Bernardes P., Libório M.P. Multimethod to prioritize projects evaluated in different formats. *MethodsX*. 2021; 8:101371. DOI: 10.1016/j.mex.2021.101371. EDN BJGJAK.
15. Podolchak N., Tsygylk N., Dziurakh Y. Building an effective personnel risks management system of the organization. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022; 4(13-118):44-52. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.262547. EDN AAOUFS.
16. Niazi M.A. Introduction to the modeling and analysis of complex systems : a review. *Complex Adaptive Systems Modeling*. 2016; 4(1):1-3. DOI: 10.1186/s40294-016-0015-x. EDN ANLFGU.

17. Mbuli N., Mathonsi M., Seitshiro M., Pretorius Ja.H.C. Decomposition forecasting methods : a review of applications in power systems. *Energy Reports*. 2020; 6:298-306. DOI: 10.1016/j.egy.2020.11.238. EDN WKEWFM.
18. Lastovkin V.F., Kozlov A.P., Zabelin V.A. Civil defense protective structures. Nizhny Novgorod, NNGASU, 2020; 179. URL: https://bibl.nngasu.ru/electronicresources/uch-metod/health_safety/873922.pdf (rus).
19. Rudenko A.A. Organizational, technological and design solutions for the restoration, repair, strengthening and replacement of damaged building elements : *monograph*. Kursk, University Book, 2025; 174. (rus).
20. Hernández-Orozco S., Zenil H., Riedel J., Uccello A., Kiani N.A., Tegnér J. Algorithmic Probability-Guided Machine Learning on Non-Differentiable Spaces. *Frontiers in Artificial Intelligence*. 2021; 3:20. DOI: 10.3389/frai.2020.567356. EDN BSPNPV.
21. Ghosh S., Zaboli A., Hong Ju., Kwon Ja. An Integrated Approach of Threat Analysis for Autonomous Vehicles Perception System. *IEEE Access*. 2023; 11:14752-14777. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3243906. EDN UPQVKP.
22. Mikhno E.P. *Elimination of consequences of accidents and natural disasters*. Moscow, Atomizdat, 1989; 288. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007653694> (rus).
23. Dvulit P., Savchuk S., Sosonka I. Accuracy estimation of site coordinates derived from GNSS-observations by non-classical error theory of measurements. *Geodesy and Geodynamics*. 2021; 12(3):347-355. DOI: 10.1016/j.geog.2021.07.005. EDN VTENPR.
24. Angermeier D., Wester H., Beilke K., Hansch G., Eichler J. Security risk assessments: modeling and risk level propagation. *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*. 2023; 7(1):25. DOI: 10.1145/3569458
25. Alamdari A.M., Jabarzadeh Y., Adams B., Samson D., Khanmohammadi S. An analytic network process model to prioritize supply chain risks in green residential megaprojects. *Operations Management Research*. 2022; 16(9):1-23. DOI: 10.1007/s12063-022-00288-2. EDN UOWIHH.
26. Bjerga T., Aven T., Zio E. Uncertainty treatment in risk analysis of complex systems: The cases of STAMP and FRAM. *Reliability Engineering and System Safety*. 2016; 156(1):203-209. DOI: 10.1016/j.res.2016.08.004

Поступила 07.05.2025, после доработки 07.09.2025;

принята к публикации 08.09.2025

Received May 07, 2025; Received in revised form September 07, 2025;

Accepted September 08, 2025

Информация об авторе

РУДЕНКО Александр Алексеевич, д.э.н., к.т.н., профессор, профессор кафедры организации строительства, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ), Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4; SPIN-код: 6922-0113; ORCID: 0009-0008-2338-0102; ResearcherID: ABA-8121-2021; AuthorID: 57224505043; PИНЦ ID: 664021; e-mail.rudenko.a@mail.ru

Information about the authors

Aleksander A. RUDENKO, Dr. Sci. (Economic), Cand. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Construction Organization, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU), 2nd Krasnoarmeyskaya st., 4, St. Petersburg, 190005, Russian Federation; SPIN-code: 6922-0113; ORCID: 0009-0008-2338-0102; ResearcherID: ABA-8121-2021; AuthorID: 57224505043; ID RSCI: 664021; e-mail.rudenko.a@mail.ru