

Руководства по безопасности

**РУКОВОДСТВО ПО АНАЛИЗУ ОПАСНОСТИ
АВАРИЙНЫХ ВЗРЫВОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЮ
ПАРАМЕТРОВ ИХ МЕХАНИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ**

РБ Г-05-039-96

Москва 2000

Федеральный надзор России по ядерной
и радиационной безопасности

РУКОВОДСТВА ПО БЕЗОПАСНОСТИ

Утверждены

постановлением

Госатомнадзора России

31 декабря 1996г. № 100

**РУКОВОДСТВО ПО АНАЛИЗУ ОПАСНОСТИ АВАРИЙНЫХ
ВЗРЫВОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ ИХ
МЕХАНИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ**

РБ Г-05-039-96

Введено в действие

с 01 августа 1997 г.

Москва 2000

Руководство по анализу опасности аварийных взрывов и определению параметров их механического действия. РБ Г-05-039-96:
Нормативный документ. - М.: НТЦ ЯРБ Госатомнадзора России, 2000.

Руководство по анализу опасности аварийных взрывов и определению параметров их механического действия (далее - Руководство) содержит положения, рекомендации и методики по анализу опасности аварийных взрывов и определению параметров, характеризующих их механическое действие, для оценки взрывоустойчивости зданий, сооружений, систем и элементов ОИАЭ.

Материалы Руководства основаны на апробированных сведениях из отраслевых нормативов и других опубликованных данных о взрывах. Рекомендуемые в приложениях Руководства инженерные методики расчетов обеспечивают получение численных значений параметров аварийных взрывов любой природы с достаточной степенью консерватизма, и их использование наиболее целесообразно в экспертных целях.

Разработчик - авторский коллектив под руководством Калиберды И.В. в составе: Бриков В.А. (ВО "ВНИПИЭТ"), Горев В.А. (МГСУ), Калиберда И.В. (НТЦ ЯРБ Госатомнадзора России), Коробкин В.Н. (НТЦ ЯРБ Госатомнадзора России), Костерев А.Е. (Госатомнадзор России СПб ПКИ), Курунов Г.Ф. (в/ч 70170, Минобороны России), Нещеретов И.И. (НТЦ ЯРБ Госатомнадзора России), Пальмин С.А. (в/ч 70170, МО России), Туляков П.В. (НТЦ ЯРБ Госатомнадзора России), Тюняев Ю.Н. (НТЦ ЯРБ Госатомнадзора России), Федоров В.Н. (МГСУ).

СОДЕРЖАНИЕ

Список сокращений.	2
Список основных обозначений.	2
Понятия, термины и определения.	2
1. Назначение и область применения.	3
2. Рекомендации по выявлению потенциальных источников аварийных взрывов на объектах.	4
3. Этапы анализа опасности воздействий аварийных взрывов для зданий и сооружений оиаэ..	5
4. Рекомендации по анализу опасности аварийных взрывов на объектах.	6
5. Основы для определения параметров вув..	7
6. Основы для определения параметров летящих предметов, образовавшихся в результате взрыва и переноса ву..	8
7. Основы для определения колебаний грунта, вызванных аварийным взрывом на объекте.	8
Приложение 1 Перечень потенциальных источников аварийных взрывов.	9
Приложение 2 Предварительная оценка опасности взрыва.	9
Приложение 3 Параметры вув при детонации вв..	10
Приложение 4 Параметры вув при разрушении резервуаров со сжатым газом..	13
Приложение 5 Параметры вув при взрыве облаков гвс (твс)	18
Приложение 6 Параметры вув при взрыве гвс (твс) в подземном резервуаре.	22

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ВВ - взрывчатое вещество

ВУВ - воздушная ударная волна

ГВС - газозвдушная смесь

ОИАЭ - объекты использования атомной энергии

ТВС - топливно-воздушная смесь

ТНТ - тринитротолуол (тротил)

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ a_1 - скорость звука в воздухе при нормальных условиях a_0 - скорость звука в возмущенной среде (газ, ГВС, ТВС) c_p - скорость распространения продольных волн в среде c_s - скорость распространения поперечных волн в среде E - энергия g - ускорение силы тяжести i - удельный импульс фазы сжатия M - масса P - давление $P_{ск}$ - давление скоростного напора $DP_{ф}$ - амплитуда избыточного давления на фронте ВУВ R - расстояние от центра возможного места взрыва до объекта T - температура в градусах Кельвина U - массовая скорость частиц в среде V - объем ТВС g_1 - показатель адиабаты газа n - коэффициент Пуассона r - плотность вещества t_+ - длительность фазы сжатия ВУВ ν - частота колебаний

Ввиду того, что в Руководстве все формулы, таблицы и рисунки включены в приложения, принят следующий порядок их нумерации: первый номер соответствует номеру приложения, второй - текущему номеру формулы в приложении. Например, формула (3.4) - четвертая формула приложения 3.

Нижний индекс "+" (соответственно, "-") обозначает, что данная величина относится к фазе сжатия (разрежения) ВУВ. Черта над символом означает, что над данной величиной произведена операция приведения, например, \bar{R} - приведенное расстояние.

ПОНЯТИЯ, ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

- Аварийный взрыв** - чрезвычайная ситуация, возникающая в самый неожиданный момент времени в ограниченном пространстве спонтанно по стечению обстоятельств (совокупности состояний протекающих процессов) или в результате ошибочных действий отдельного лица (лиц), причиной или следствием которой стал взрыв на потенциально опасном объекте, оказывающая негативное влияние на окружающую среду.
- Взрыв в воздушной среде** - локализованный в пространстве процесс быстрого перехода потенциальной энергии источника (химической, тепловой, электрической, механической) в кинетическую энергию окружающей среды в форме волны давления, колебаний грунта, летящих предметов и теплового излучения области энерговыделения.
- Взрывоустойчивость объекта** - свойство объекта выполнять свои функции при воздействии механических факторов аварийного взрыва без нарушения безопасности.
- Взрывчатые вещества** - химические соединения или смеси, способные под воздействием внешнего импульса (удара, тепла и т.д.) к протекающим с большой скоростью экзотермическим химическим реакциям.
- Воздушная ударная волна** - распространяющееся с большой скоростью в атмосфере возмущение, на переднем фронте которого скачкообразно изменяются все физические параметры (давление, плотность, температура и массовая скорость). Для воздушной ударной волны характерно наличие двух фаз - сжатия и разрежения с давлением выше и, соответственно, ниже атмосферного.

6. **Вторичные осколки** - незакрепленные предметы, находящиеся на территории объекта или его сооружений и вовлекаемые в движение проходящей ВУВ от аварийного взрыва.
7. **Детонационный взрыв облаков газо- и топливновоздушных смесей** - энерговыделение в объеме облака при распространении экзотермической химической реакции со сверхзвуковой скоростью.
8. **Дефлаграционный взрыв облаков газо- и топливновоздушных смесей** - энерговыделение в объеме облака при распространении экзотермической химической реакции с дозвуковой скоростью (взрывное горение).
9. **Источник аварийных взрывов** - объект, содержащий взрывоопасные вещества или взрывоопасные смеси (ВВ, ГВС, ТВС) и определяемый в связи с этим как потенциально опасный объект.
10. **Объект** - здание, сооружение или комплекс, функционирующий как единое целое.
11. **Первичные осколки** - продукты разрушения оболочек резервуаров или контейнеров при взрывах внутри (зданий, сооружений или комплексов) объектов.
12. **Поражающие факторы взрыва в атмосфере** - следствия взрывных процессов, представляющие опасность для строительных конструкций, оборудования и человека. Наибольшим разрушающим потенциалом и дальностью действия обладают воздушные ударные и сейсмозврывные волны, а также летящие предметы (первичные и вторичные осколки, обломки, детали оборудования). Вторичным фактором взрыва в атмосфере является пожар.
13. **Сейсмозврывные волны** - возмущения, распространяющиеся в грунте и вызывающие колебания оснований зданий и сооружений. Различают первичные сейсмозврывные волны, распространяющиеся от места взрыва, и вторичные, в том числе генерируемые ВУВ.
14. **Стехиометрическая смесь** - смесь ГВС (ТВС), на каждый моль горючего вещества которой приходится необходимое количество молей кислорода для окисления, т.е. химическая реакция завершается полностью.
15. **Сценарий** - логическая последовательность взаимосвязанных состояний объекта или сложной технической системы, возможных при внешних воздействиях.

1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

- 1.1. Руководство предназначено для выполнения инженерных оценок опасности аварийных взрывов на потенциально опасных объектах.
- 1.2. В Руководстве рассматриваются взрывы, возникающие на стационарных и перемещающихся источниках аварийных взрывов.
- 1.3. Руководство развивает основные положения и требования нормативного документа "Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на ядерно- и радиационно опасные объекты" и положений руководства по безопасности МАГАТЭ N 50-SG-D5 в части определения параметров механического действия взрывов на объектах, внешних по отношению к важным для безопасности зданиям, сооружениям, системам и элементам ОИАЭ.
- 1.4. В Руководстве содержатся практические рекомендации по обследованию района и площадки ОИАЭ, сбору и обработке информации об источниках аварийных взрывов, выбору расчетных моделей и методик для определения параметров воздействий, а также инженерные методики, примеры расчета, справочные данные.
- 1.5. Руководство не содержит положений для проведения оценок опасности ядерных взрывов, а также взрывов от неустановленных источников, инициируемых диверсионными действиями вблизи ОИАЭ или внутри зданий и сооружений ОИАЭ.
- 1.6. Руководство не содержит положений, рекомендаций и методик по определению параметров ВУВ, затекающих во внутренние объемы помещений.

Если установлено, что может иметь место затекание ВУВ в помещения зданий и сооружений ОИАЭ, важных для безопасности, необходимо анализировать нагрузки от затекающих ВУВ на системы и элементы, важные для безопасности, и последствия, возникающие при этом, на безопасность ОИАЭ, руководствуясь для этого требованиями специального нормативного документа.

- 1.7. Руководство рекомендуется для специалистов системы Госатомнадзора России в экспертных целях и для эксплуатирующих организаций ОИАЭ.

2. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫЯВЛЕНИЮ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ АВАРИЙНЫХ ВЗРЫВОВ НА ОБЪЕКТАХ

- 2.1. Объекты на площадке ОИАЭ и на исследуемой территории вблизи ОИАЭ включаются в перечень потенциальных источников аварийных взрывов при наличии у них следующего:

- конденсированных ВВ (независимо от массы и способа использования);
- жидких или газообразных энергоносителей в резервуарах (независимо от вида энергоносителя, способа его использования и объема резервуара);
- сосудов (резервуаров) с газами под давлением.

- 2.2. В качестве объектов, содержащих потенциальные источники аварийных взрывов, следует рассматривать (перечень неисчерпывающий):

- компоненты химических и нефтеперегонных комплексов;
- хранилища энергоносителей (жидких и газообразных) и ВВ;
- транспортные магистрали (воздушные, наземные, водные);
- транспортные сооружения (доки, терминалы, причалы, порты);
- буровые вышки, нефтяные скважины;
- шахты, карьеры;
- трубопроводы для перекачки жидких и газообразных энергоносителей;
- объекты оборонного комплекса.

2.3. Рекомендуется принимать радиус исследуемой зоны относительно периметра ограды площадки ОИАЭ не менее 5 км для ядерных установок, радиационных источников и пунктов хранения ядерных материалов, радиоактивных веществ и радиоактивных отходов; и не менее 2 км - для радиационных источников.

Необходимо рассматривать и учитывать при анализе опасности аварийных взрывов объекты оборонного комплекса, нефтяные терминалы, магистральные нефте- и газопроводы, другие объекты, характеризующиеся высокими показателями риска взрыво- и пожароопасности, если они находятся в пределах 10-ти километровой зоны относительно периметра ограды площадки ОИАЭ.

На этапе размещения ОИАЭ рекомендуется их дистанционирование от объектов оборонного комплекса, а также других взрывоопасных объектов, характеризующихся высокими показателями риска, на расстояния более 10 км.

2.4. При описании потенциальных источников аварийных взрывов на объектах, следует использовать документацию, относящуюся ко всем аспектам их функционирования, включая инструкции по эксплуатации.

2.5. Сведения о наличии и характеристиках потенциальных источников аварийных взрывов на объектах следует получать при обследовании района и площадки размещения ОИАЭ. Она должна быть согласована административными органами, контролирующими и эксплуатирующими эти объекты.

2.6. При анализе потенциальных источников аварийных взрывов следует принимать во внимание:

- характеристики источника (объем, масса, тротильный эквивалент ВВ);
- месторасположение источника (удаленность от ОИАЭ, рельеф местности, наличие заграждений, естественных и искусственных препятствий и прочие факторы);
- особенности хранения ВВ (тип и конструкция хранилища, размещение ВВ в хранилище, высота хранилища над поверхностью земли, наличие мер по предупреждению взрыва);
- возможные внешние исходные события для инициирования взрыва на объектах;
- другую информацию, позволяющую уточнить расчетную модель взрыва и возможные последствия от его механического действия.

2.7. Для определения степени опасности потенциальных источников аварийных взрывов на объектах полезна следующая информация:

- данные о количествах опасных материалов;
- параметры технологических процессов;
- максимальные объемы резервуаров, складов и других хранилищ;
- технические характеристики трубопроводов (маршруты, конструкции, изолирующие системы, эксплуатационные условия);
- наличие (отсутствие) аварий на анализируемом объекте - источники, сценарии их протекания и предусмотренные системы предупреждения взрыва и/или последствий взрыва;
- возможность взаимодействия материалов, хранящихся на разных складах или применяемых в различных процессах;
- максимальное количество ВВ;
- данные о розе ветров и других метеорологических особенностях района;
- физико-механические и динамические характеристики грунтов в данном районе.

2.8. При анализе взрывоопасности наземного, водного и воздушного транспорта следует обращать внимание на следующие факторы:

- порты, гавани, аэропорты, каналы, развязки, автомобильные и железнодорожные (в том числе сортировочные) станции;
- характеристики грузопотоков в районе;
- типы и количества материалов, перевозимых транспортным средством по каждому маршруту;
- размеры транспортных резервуаров, скорость движения автотранспорта, сведения о системах погрузки автомобильного транспорта, развилках дорог и их перекрестках, интенсивности движения на дорогах, маршрутах движения транспорта вблизи площадки ОИАЭ;
- статистические данные о дорожно-транспортных происшествиях, в том числе со средствами, перевозящими взрывоопасные грузы, и их последствиях.

2.9. Отражать на генеральном плане площадки ОИАЭ и на ситуационном плане в пределах исследуемой территории размещение всех источников аварийных взрывов, выявленных на площадке ОИАЭ и на исследуемой зоне вблизи ОИАЭ (п. 2.3 Руководства), и указывать расстояния от них до зданий и сооружений ОИАЭ, важных для безопасности.

3. ЭТАПЫ АНАЛИЗА ОПАСНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЙ АВАРИЙНЫХ ВЗРЫВОВ ДЛЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ОИАЭ

Анализ опасности воздействий аварийных взрывов на объектах для зданий и сооружений ОИАЭ выполняется в следующей последовательности.

Этап 1 - на основании данных обследований на исследуемой территории и на площадке ОИАЭ определяются возможные источники аварийных взрывов и расстояния от каждого источника до зданий и сооружений ОИАЭ, важных для безопасности.

Этап 2 - определяются параметры и характеристики основных поражающих факторов от всех источников аварийных взрывов.

Этап 3 - определяются критерии взрывоустойчивости зданий и сооружений, важных для безопасности ОИАЭ.

Дальнейшая последовательность анализа зависит от того, производится ли оценка взрывоустойчивости зданий и сооружений действующего (реконструируемого) объекта или вновь проектируемого объекта.

Этап 3.1 - при оценке взрывоустойчивости действующих (реконструируемых) объектов в качестве критерия используется реальная взрывоустойчивость зданий (сооружений); при этом допускается принимать во внимание сведения об их устойчивости к другим типам нагрузок и воздействий (длительных, кратковременных, особых).

Этап 3.2 - при оценке взрывоустойчивости вновь проектируемых зданий и сооружений анализируются критерии, заложенные в

проектные основы для проектирования зданий, сооружений, систем и элементов, важных для безопасности.

Одним из таких критериев применительно к воздействию ВУВ является величина допускаемого давления на здания и сооружения, важные для безопасности, определяемая в соответствии с требованиями действующих нормативных документов и/или на основании результатов обследования площадки ОИАЭ и исследуемой территории вокруг ОИАЭ.

Этап 4 - проводится оценка опасности аварийных взрывов.

Этап 4.1 - для действующих объектов проводится консервативная оценка по выбранным критериям взрывоустойчивости зданий и сооружений на воздействия, которые могут оказывать выявленные источники взрывной опасности, на основе экспресс-оценок. Для реконструируемых и проектируемых ОИАЭ применение экспресс-оценок допустимо только для предварительных оценок.

Этап 4.2 - если полученные консервативные результаты на этапе 4.1 для действующих объектов не удовлетворяют поставленным целям оценок взрывоустойчивости, производится уточненный анализ взрывоустойчивости на основе реалистических оценок (уточненных моделей взрыва и моделей сооружений).

Этап 4.3 - анализ взрывоустойчивости на основе реалистических оценок для проектируемых и реконструируемых ОИАЭ.

Результаты этапов 4.2 и 4.3 более предпочтительны для принятия решения для действующих, реконструируемых и проектируемых ОИАЭ.

Этап 5 - допускается применение вероятностных подходов при определении опасности аварийных взрывов в целях снижения консерватизма оценок, если имеются данные количественных оценок вероятности аварийных взрывов, полученных методами статистической обработки данных по аварийным взрывам на объектах-источниках, аналогичных анализируемому.

Этап 6 - если уточненный анализ взрывоустойчивости показывает, что взрывоустойчивость зданий и сооружений ОИАЭ не обеспечивается, следует проводить инженерно-технические и организационные мероприятия. В их числе: перенос источников аварийных взрывов, реконструкция зданий или сооружений ОИАЭ, разрушение которых приводит к последствиям, оказывающим влияние на системы и элементы ОИАЭ, важные для безопасности, и на безопасность ОИАЭ в целом.

Могут также ставиться вопросы о запрещении эксплуатации этих источников, приводиться рекомендации по уточнению регламентов их эксплуатации и принятию защитных мер на предприятиях - владельцах ВВ.

4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО АНАЛИЗУ ОПАСНОСТИ АВАРИЙНЫХ ВЗРЫВОВ НА ОБЪЕКТАХ

4.1. На основе данных об аварийных взрывах в промышленности и на транспорте и их статистики в качестве расчетных физических моделей внешних аварийных взрывов в Руководстве приняты:

4.1.1. Детонация компактной массы ВВ.

4.1.2. Детонация облака (объема) газовойдушной (ГВС) или/и топливно-воздушной смеси (ТВС).

4.1.3 Дефлаграция (взрывное горение) облаков (объемов) этих же смесей (ГВС и ТВС).

4.1.4. Разрушение резервуаров (сосудов) под действием внутреннего квазистатического давления.

Перечень потенциальных источников аварийных взрывов приведен в приложении 1. Оно содержит рекомендации по приемлемым физическим моделям аварийных взрывов для каждого объекта и необходимые расчетные технические характеристики. Перечень объектов дан из специфики типовой промышленной инфраструктуры.

4.2. Взрывы от источников, выявленных при обследовании на площадке ОИАЭ и в исследуемой зоне вблизи ОИАЭ, следует классифицировать по типам ведущего процесса генерации ВУВ, руководствуясь сведениями, приведенными в таблице 1.

4.3. В целях обеспечения необходимого и достаточного консерватизма оценок при определении параметров поражающих факторов от источников аварийных взрывов следует принимать во внимание:

·возможность инициирования одного источника другим (например, ударная волна от взрыва конденсированного ВВ может вызвать разрушение или разгерметизацию емкости с горючим веществом или опрокидывание железнодорожного состава, в котором имеются потенциальные источники взрыва);

·тепловое излучение часто приводит к нагреву близко расположенных емкостей с перегретой жидкостью, что является причиной взрыва емкости, а если в емкости находится горючее вещество, к последующему взрыву газо- и капельно-воздушной смеси; летящий осколок может пробить трубопровод или емкость под давлением и т.д.);

·возможность совместного воздействия поражающих факторов от различных источников на объект.

4.4. В случае разгерметизации емкости с горючим газом под давлением истекает высокоскоростная турбулентная струя. Режим смешения с воздухом определяется ее параметрами и не зависит от метеословий. Размеры взрывоопасного облака определяются поверхностью, на которой концентрация ВВ соответствует нижнему концентрационному пределу, а скорость взрывного превращения - скоростным характеристикам турбулентной струи. При расчете параметров взрывной волны, генерированной сгоранием такого облака, следует использовать консервативный подход, считая, что струя направлена в сторону ОИАЭ.

Таблица 1

Классификация аварийных взрывов

Тип аварийного взрыва	Ведущий взрывной процесс генерации ВУВ	Особые условия
Взрыв ВВ	Детонация ВВ	1. ВВ в прочной оболочке 2. ВВ без оболочки или в непрочной оболочке
Взрыв ТВС в замкнутом объеме при отсутствии начального избыточного давления	1. Объемная детонация смеси 2. Объемная дефлаграция смеси	1. Газо- и паровоздушная смесь 2. Капельно-воздушная смесь 3. Пылевзвешенная смесь
То же, при наличии начального избыточного давления	1. Объемная детонация смеси 2. Объемная дефлаграция смеси	1. Горение смеси после разрушения емкости 2. Без горения смеси после разрушения емкости

Взрыв облака ТВС в неограниченном пространстве	1. Объемная детонация смеси 2. Объемная дефлаграция смеси	-
Разрушение емкости с газами или жидкостями, в том числе емкостей с перегретыми жидкостями	Распад начального разрыва (скачка)	1. Без горения смеси после разрушения емкости 2. При горении смеси внутри емкости 3. Горение смеси после разрушения емкости

Примечание: для каждого типа аварийного взрыва ведущий взрывной процесс и особые условия его протекания могут реализовываться в любом сочетании. В графе "Особые условия" отражены либо специфика реализации каждого взрывного процесса, либо дополнительные факторы

4.5. При разрушении емкости или аппарата со сжиженным горючим газом, хранящимся при температуре окружающей среды, происходит быстрое вскипание жидкого газа и диспергирование его на мелкие капли. Следует определять долю диспергированного вещества, используя диаграммы состояния. Оставшаяся часть вещества попадает на грунт и испаряется. Образовавшееся после испарения и диспергирования облако растекается под действием силы тяжести, перемешиваясь с воздухом. Одновременно происходит дрейф и рассеивание облака под действием атмосферной турбулентности.

Следует оценивать взрывоопасность такого облака. Принимается, что дрейф (если позволяет рельеф местности) происходит по направлению к ОИАЭ. Необходимо учитывать, что дрейф в сторону другого источника взрыва может привести к покрытию источника облаком горючей смеси и усилению взрывного воздействия облака и источника на объект.

4.6. При оценке воздействия взрывов от перемещающихся источников следует исходить из предположения, что на данном транспортном маршруте происходит взрыв всего транспортируемого за один раз материала. Источник принимается максимально приближенным к ОИАЭ или к его системам и элементам, важным для безопасности.

5. ОСНОВЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВУВ

5.1. В Руководстве рассматриваются только те параметры ВУВ, которые определяют ее механическое действие.

5.2. В случае взрыва конденсированного ВВ значения параметров ВУВ допускается определять только одним параметром - полным энерговыделением. Для экспресс-оценок параметра DP_{ϕ} можно использовать графики приложения 2. Аналитическая методика определения параметров ВУВ приведена в приложении 3.

5.5. Взрыв облака горючей смеси может происходить в одном из двух качественно отличающихся режимах - дефлаграционном и детонационном. В процессе развития взрыва возможен переход горения из первого режима во второй.

В случае детонационного взрыва параметры ВУВ определяются энергией, выделившейся при взрыве облака ГВС. При дефлаграционном взрыве облака горючей смеси параметры ВУВ зависят от скорости распространения пламени, геометрии и размеров облака. Параметры ВУВ при взрыве облака определяются с помощью методик, приведенных в приложении 5.

5.6. Методика определения параметров ВУВ от взрыва ГВС или ТВС в подземном резервуаре приведена в приложении 6.

6. ОСНОВЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛЕТАЩИХ ПРЕДМЕТОВ, ОБРАЗОВАВШИХСЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВЗРЫВА И ПЕРЕНОСА ВУВ

Наряду с учетом действия ВУВ на строительные конструкции объекта необходимо принимать во внимание возможность воздействия летящих предметов (первичных и вторичных осколков). Если первичные осколки образуются при разрушении оболочек резервуаров, то вторичные - имеют двоякую природу: незакрепленные предметы (стоящие или лежащие блоки, плиты и оборудование), вовлеченные в движение при ВУВ, закрепленные ранее предметы (столбы линий электропередач и элементы трубопроводов и т.д.), но разрушенные ВУВ и вовлеченные в движение.

Исходными данными для последующего расчета прочности конструкций, испытывающих воздействие ВУВ, являются: масса, скорость и размеры летящего предмета, площадь контакта в момент удара.

Место приложения нагрузки определяется исходя из направления предполагаемого воздействия и угла подлета летящих предметов. В приложении 7 приведена методика определения параметров летящих предметов при взрывах.

7. ОСНОВЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ГРУНТА, ВЫЗВАННЫХ АВАРИЙНЫМ ВЗРЫВОМ НА ОБЪЕКТЕ

7.1. При взрывах на объектах следует анализировать сотрясение грунта, которое передает колебания на фундамент сооружения и далее на все конструкции, системы и оборудование.

7.2. Для анализа устойчивости конструкций зданий, оборудования и трубопроводов, важных для безопасности, при определении нагрузок, возникающих при колебаниях грунта от взрыва, необходимы исходные данные в виде функции изменения во времени перемещений, скоростей и ускорений в свободном поле на уровне отметки основания, а также динамические характеристики грунта.

7.3. Следует учитывать зависимости характеристик и параметров колебаний грунта, возникающих от взрыва, от количества энергии, выделившейся при взрыве, расстояния до объекта и физико-механических характеристик грунтов основания (см. например, [5]).

7.4. При анализе взрывоустойчивости ОИАЭ необходимо оценивать возможное повреждение зданий и сооружений в результате воздействия на них сейсмозврывных волн, генерируемых аварийным взрывом и распространяющихся в грунте. Для прогноза сохранности зданий допускается использование методики, повсеместно принятой в практике проведения безопасных взрывных работ и заключающейся в сравнении величин максимально возможной массовой скорости сейсмозврывной волны, распространяющейся в данном грунте от источника, с предельно допустимой скоростью колебания основания для данного сооружения, с учетом конструктивных особенностей и состояния здания. Методика приведена в приложении 8.

7.5. Характеристики, описывающие колебания грунта от взрыва (временная функция и соответствующие ей спектры ответа), могут устанавливаться по результатам натурных испытаний на самой площадке. Допускается применять на практике процедуры определения параметров колебания грунта для проектных основ, основанные на пересчете результатов модельных взрывов малой мощности. Качество ВВ и удаленность места взрыва должны выбираться с учетом правомерности полученных записей колебаний для применения лишь в дальней зоне взрыва, т.е. там, где поведение грунта заведомо подчиняется законом теории упругости.

7.6. В приложении 8 приводятся аналитические зависимости для определения спектра колебаний для идеальной упругой среды и Среды с поглощением в случае сферического источника. Там же для зарядов ВВ, расположенных на поверхности, приведены примеры экспериментально полученных зависимостей для спектров колебаний. По мере удаления от центра взрыва спектр качественно изменяется и его максимум монотонно переходит в область низких частот.

7.7. Допускается синтезировать спектр колебаний грунта от взрыва на основе имеющихся аналогов для известных грунтовых условий, если может быть установлено соответствие характеристик грунта аналога и данной площадки.

7.8. Акселерограммы и спектры ответа, полученные для поверхности грунта и принятые для проектных основ согласно рекомендациям, приведенным в пп. 7.5, 7.6, 7.7, используются для определения поэтажных акселерограмм и спектров ответа. Рекомендуется применять динамические или линейно-спектральные методы расчетного анализа конструкций, используемые при оценках сейсмостойкости в соответствии с действующими нормативными документами (ПНАЭ Г-7-002-86, ПНАЭ Г-5-006-87 и др.).

Приложение 1

(рекомендуемое)

Таблица 1.1

Перечень потенциальных источников аварийных взрывов*

Идентификационный признак	Наименование или функциональное назначение объекта	Определяемые технические характеристики	Рекомендуемая расчетная модель
ВВ	1. Хранилище (склад) ВВ или изделий, содержащих ВВ 2. Перевозки ВВ и изделий, содержащих ВВ	1. Тип и коэффициент эквивалентности ВВ (по табл. 3.1) 2. Полная масса ВВ 3. Геометрия объема, занимаемого ВВ	Детонация ВВ
Энергоносители в резервуарах	1. Емкости для топлив и масел 2. Резервуары или баллоны с газообразными или жидкими углеводородами 3. Железнодорожные и автомобильные емкости для углеводородов 4. Газгольдер	1. Тип энергоносителя и физико-химические характеристики его горения и взрыва 2. Объем резервуара 3. Давление в резервуаре	Детонация ГВС (ТВС) Дефлаграция ГВС (ТВС) Разрушение резервуаров внутренним давлением
Расходуемые энергоносители	1. Отсек электролизной 2. Водородная станция 3. Дизельная 4. Котельная 5. Автомобили, работающие на газовом топливе	1. Тип энергоносителя 2. Объем емкости или производительность 3. Размеры помещения 4. Физико-химические характеристики горения и взрыва	Детонация ГВС (ТВС) Дефлаграция ГВС (ТВС)
Сосуды высокого давления	Баллоны со сжатыми инертными газами (воздух, азот, аргон, гелий и т.д.)	1. Объем сосуда 2. Давление в сосуде 3. Вид газа	Разрушение резервуаров внутренним давлением

* Перечень отражает специфику промышленной инфраструктуры района размещения ОИАЭ, но не является исчерпывающим

Приложение 2

(рекомендуемое)

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ ВЗРЫВА

1. Для предварительной оценки опасности установленных на площадке и в исследуемой зоне вокруг ОИАЭ потенциальных источников аварийных взрывов для зданий и сооружений ОИАЭ используется зависимость избыточного давления DP_{ϕ} на фронте проходящей ВУВ от расстояния R между источником взрыва и конструктивными элементами сооружений.

Если в качестве критерия устойчивости ОИАЭ в целом или его отдельных элементов к воздействию ВУВ принимается значение DP_{ϕ} , соответствующее предельно допустимым нагрузкам на конструкции сооружений, то по известной зависимости $DP_{\phi}(R)$ можно определить:

· минимальное безопасное расстояние от ОИАЭ до источника взрыва при известных параметрах источника;

· максимально допускаемое количество взрывоопасного вещества при известном расстоянии от источника взрыва до ОИАЭ.

Для экспресс-оценок устойчивости зданий, сооружений и конструктивных элементов ОИАЭ рекомендуется использовать рис. 2.1, на котором график зависимости DP_{ϕ} от приведенного расстояния R при взрыве ТНТ совмещен со шкалой уровней повреждений указанных объектов как функции DP_{ϕ} для ВУВ с длительностью $t_+ > 0,1$ с.

При расчете взрыва ВВ, энерговыделение которого отличается от энерговыделения ТНТ, эффективная масса ТНТ определяется по формуле (3.2) приложения 3.

2. При оценке опасности взрывов облаков газовых (топливно-воздушных) смесей величина DP_{ϕ} может быть рассчитана по формуле:

$$DP_{\phi} = P_0 (0,8 m + 2,2 m^2 + 1,2 m^3) \quad (2.1)$$

где: P_0 - атмосферное давление; R - расстояние от центра облака (за его пределами), м;

$$m = 0,0605 \sqrt{q_m m_r i R}$$

где: q_m - удельная энергия взрыва стехиометрической смеси газа с воздухом, Дж/кг, определяемая по табл. 5.1; m_r - масса газа, кг.

3. В подавляющем большинстве случаев аварийные взрывы газозвудушных смесей происходят в режиме дефлаграционного взрыва. Скорость горения при дефлаграционном взрыве с учетом загроможденности пространства и мощности источника зажигания ориентировочно может быть определена по рис. 2.2. К сильным источникам зажигания относятся: взрыв конденсированного ВВ, струи горящего газа, продукты сгорания, истекающие из помещений и оборудования при внутреннем взрыве.

Полученную из графиков рис. 2.2 оценку скорости горения ГВС или ТВС можно использовать при расчетах параметров ВУВ дефлаграционного взрыва (приложение 5).

4. При взрывах сосудов, находящихся под внутренним давлением газа, предварительную оценку зависимости избыточного давления на фронте ВУВ от расстояния и от давления газа в сосуде можно получать из графиков рис. 2.3.

Приложение 3
(рекомендуемое)

ПАРАМЕТРЫ ВУВ ПРИ ДЕТОНАЦИИ ВВ

Исходными данными для оценки параметров ВУВ при наземном взрыве ВВ являются полная масса ВВ $M_{вв}$ (в кг), находящегося на объекте, и расстояние R (в м) от центра возможного взрыва до рассматриваемой точки. Затратами энергии на разрушение ограждающих конструкций пренебрегаем.

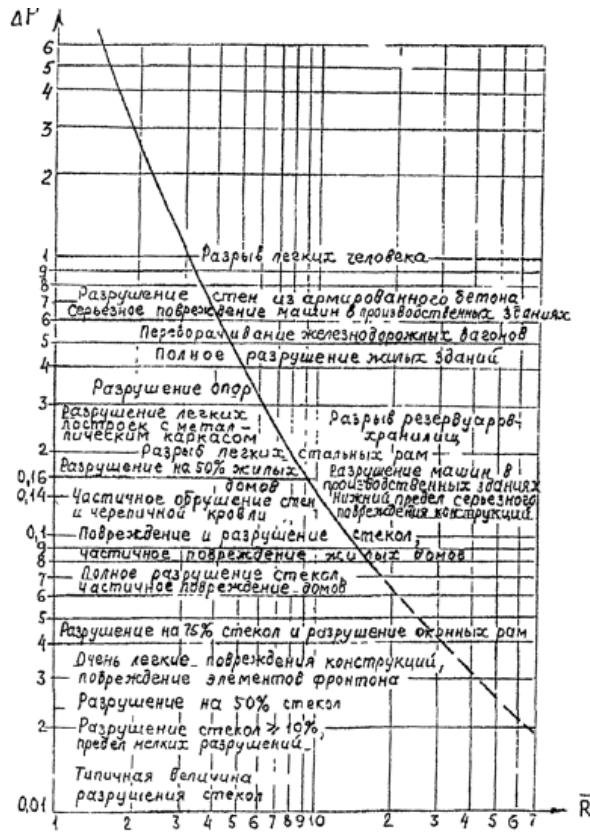


Рис. 2.1. Классификация разрушений при взрыве TNT

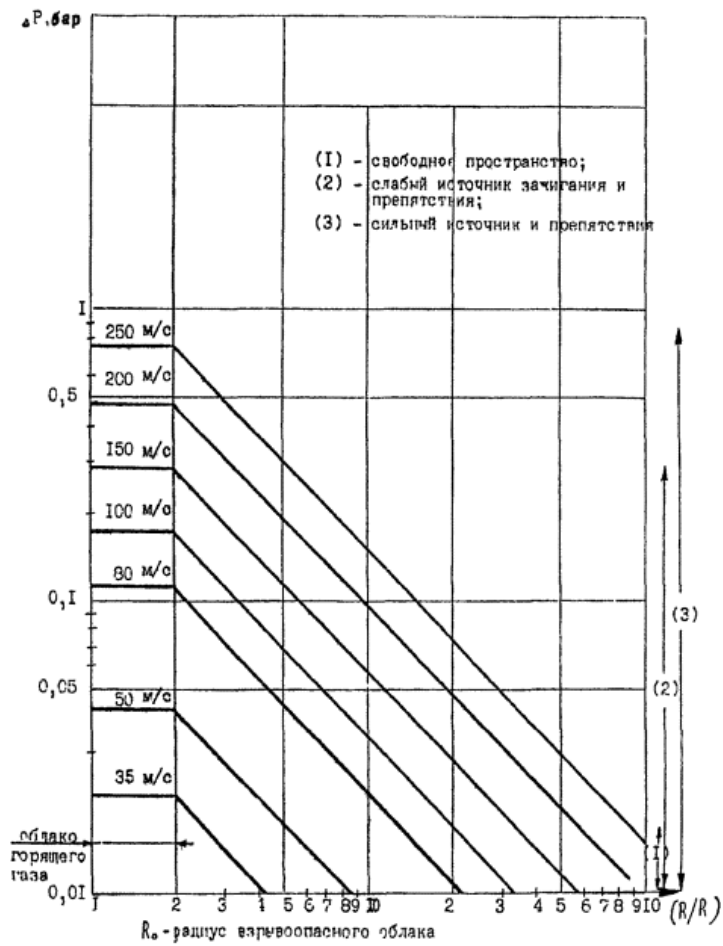


Рис. 2.2 Зависимость давления от расстояния на фронте ВУВ для различных скоростей дефлаграции

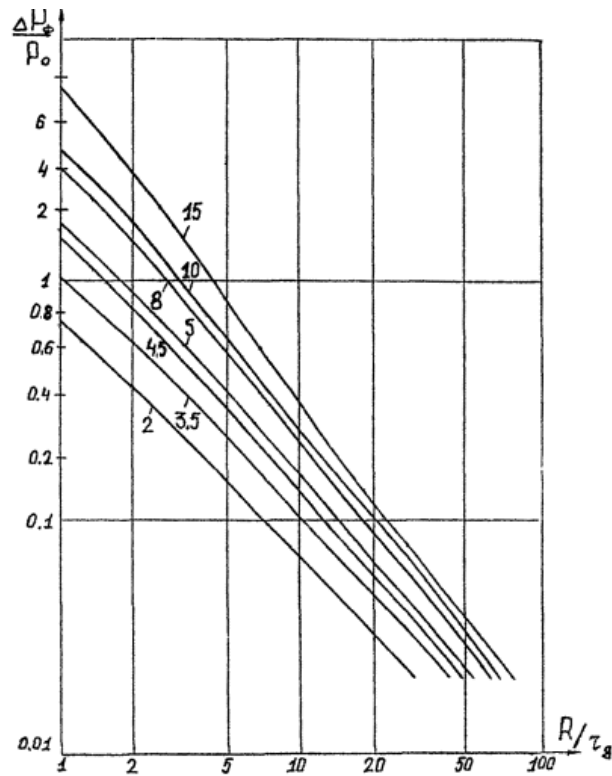


Рис. 2.3. Зависимость DP_{ϕ} на фронте ВУВ, генерированной разрывом сосуда с газом, находящимся под давлением, от безразмерного состояния

2; 3,5; 4,5; 5; 8; 10; 15 - давление P в сосуде перед взрывом (кг/см²); R - расстояние от сосуда до сооружения, rg - радиус полусферы, объем которой равен объему сосуда с газом

Порядок расчета параметров ВУВ существенным образом зависит от величины приведенного расстояния R :

$$\bar{R} = R Q_{3\phi}^{-1/3}, \text{ м} \cdot \text{кг}^{-1/3} \quad (3.1)$$

Эффективная масса ВВ определяется как

$$Q_{эф} = (1 - \epsilon) a M_{вв}, \quad (3.2)$$

где: ϵ - доля энергии взрыва, расходуемая на образование воронки (для скальных грунтов $\epsilon = 0,05$, для мягких $\epsilon = 0,2$; при консервативных оценках $\epsilon = 0$), a - коэффициент эквивалентности ВВ, равный отношению удельных энергий рассматриваемого ВВ и ТНТ (удельная энергия взрыва ТНТ принята равной 4520 кДж/кг [4]), определяемый по табл. 3.1, если известен конкретный тип ВВ, и назначаемый равным 1,5 при неизвестном типе ВВ.

Таблица 3.1

Коэффициенты эквивалентности a и плотности $P_{вв}$ (т/м^3) некоторых широко используемых ВВ

ВВ	$a/P_{вв}$	ВВ	$a/P_{вв}$
ТНТ	1,0/1,6	Пенталит	1,0/1,66
Гексоген	1,19/1,66	Октол	0,99/0,6
Октоген	1,26/1,9	ТГ 50/50	1,14/1,66
ТЭН	1,28/1,77	Амматол	0,59/1,6
Тетрил	1,0/1,73	А-IX-2	1,55/1,72

В табл. 3.1 - пенталит: 0,5 ТЭН, 0,5 ТНТ; октол: 0,7 октоген, 0,3 ТНТ; ТГ 50/50: 0,5 ТНТ, 0,5 гексоген; амматол: 0,8 ТНТ, 0,2 NH_4NO_3 ; А-IX-2: 0,76 гексоген, 0,04 - флегматизатор, 0,2 АЛ.

Избыточное давление на фронте ВУВ определяется по формулам:

I. Для расстояний $1,2 \leq \bar{R} < 17,8 \text{ м} \cdot \text{кг}^{-1/3}$

$$DP_{ф} = 100 (0,92 + (3,5 + 10,6/\bar{R})/\bar{R})/\bar{R}, \text{ кПа} \quad (3.3)$$

II. Для расстояний $17,8 \leq \bar{R} < 1000 \text{ м} \cdot \text{кг}^{-1/3}$

$$DP_{ф} = 420 \bar{R}^{-1,45}, \text{ кПа} \quad (3.4)$$

Длительность фазы сжатия ВУВ равна

I. Для расстояний $1,2 \leq \bar{R} < 10,0 \text{ м} \cdot \text{кг}^{-1/3}$

$$\tau_+ = 1,73 \sqrt{Q_{эф}} (\bar{R})^{1/2}, \text{ мс.} \quad (3.5)$$

II. Для расстояний $10 \leq \bar{R} < 1000 \text{ м} \cdot \text{кг}^{-1/3}$

$$\tau_+ = 6,5943 \sqrt{Q_{эф}} [\text{Log}_{10}(0,4\bar{R})]^{0,4}, \text{ мс.} \quad (3.6)$$

Удельный импульс фазы сжатия в интервале расстояний $1,2 \leq \bar{R} < 1000 \text{ м} \cdot \text{кг}^{-1/3}$ определяется по формуле:

$$i_+ = 3503 \sqrt{Q_{эф}} / \bar{R}, \text{ Па с.} \quad (3.7)$$

Формулы (3.3)-(3.7) справедливы для взрывов в однородной или неоднородной нормальной атмосфере (т.е. с отрицательным суммарным градиентом скоростей ветра и звука по высоте). Случай неоднородной аномальной атмосферы с положительным суммарным градиентом скоростей ветра и звука по высоте в Руководстве не рассматривается. Как известно (см. например, [12, 26-28], в этом случае на расстояниях, где $DP_{ф} \leq 200 \text{ Па}$, избыточное давление на фронте слабых ВУВ может на порядок и более превышать аналогичную величину для однородной атмосферы. Если заряд рассматриваемого ВВ имеет удлиненную форму (например, железнодорожный вагон с боеприпасами), то формулы (3.3) - (3.7) применимы на расстояниях, превышающих наибольший размер заряда.

Основные параметры ВУВ ($\Delta P_{ф}, \tau_+ / Q_{эф}^{1/3}, i_+ / Q_{эф}^{1/3}$) в зависимости от \bar{R} для ТНТ приведены на рис. 3.1.

Для произвольного ВВ на рис. 3.2 - 3.3 построены графики зависимостей от безразмерного расстояния h , позволяющие наиболее полно рассчитать параметры ВУВ; на рис. 3.2 кривые 1-8 - зависимости $\Delta P_{ф}, \Delta P_-, P_{отр}, P_{отр}^-, i_+ / Q_{эф}^{1/3}, i_- / Q_{эф}^{1/3}, i_{отр} / Q_{эф}^{1/3}, i_{отр}^- / Q_{эф}^{1/3}$; при использовании рис. 3.2 следует вместо величины $Q_{эф}$ брать ее удвоенное значение.

Кривые 1-7 на рис. 3.3 - это зависимости $t_R / Q_{эф}^{1/3}, \tau_+ / Q_{эф}^{1/3}, \tau_- / Q_{эф}^{1/3}, i_+ / Q_{эф}^{1/3}, i_- / Q_{эф}^{1/3}, D_{ф}, U_{ф}$.

Здесь приняты следующие обозначения: $P_{отр}$ - давление в отраженной волне; $i_{отр}$ - импульс отраженной волны; t_R - время прихода ВУВ в данную точку; i_+ - длина ВУВ в фазе сжатия; $D_{ф}$ - скорость фронта ВУВ; $U_{ф}$ - массовая скорость частиц во фронте ВУВ; нижний (или верхний) индекс "-" означает принадлежность данного параметра к фазе разрежения; $h = R/r_0$, $r_0 = 0,062 (Q_{эф}/P_{вв})$; r_0 - радиус эквивалентного сферического заряда; $P_{вв}$ - плотность ВВ, определяемая по табл. 3.1; связь между h и $\bar{R} : R = 0,062 h / P_{вв}^{1/3}$.

Пример расчета. По железной дороге, минимальное расстояние от которой до ОИАЭ 1325 м, может перевозиться в двух соседних вагонах по 30 т ВВ любого типа. Требуется оценить величину избыточного давления во фронте ВУВ и длительность фазы сжатия, воздействующей на ОИАЭ при аварийном взрыве.

Для оценки возможного уровня воздействия предполагаем, что при взрыве ВВ в одном из вагонов происходит детонация ВВ и в другом.

Принимая во внимание, что ВВ могут быть различных типов, по формуле (3.2) находим $Q_{эф} = 1,0 \cdot 2,0 \cdot 30,0 \cdot 10^3 = 9,0 \cdot 10^4 \text{ кг}$, по формуле (3.1)

$$\bar{R} = 1325 / (9,0 \cdot 10^4)^{1/3} = 29,6 \text{ м/кг}^{1/3}$$

ΔP_{TNT} определяем по формуле (3.4):

$$\Delta P_{\phi} = 420 (29,6)^{-1,45} = 3,08 \text{ кПа.}$$

Длительность фазы сжатия определяем по формуле (3.6):

$$\tau_{+} = 6,594 (\log_{10} (0,4 \times 29,6)^{0,4} (9,0 \times 10^4)^{1/3}) = 0,304 \text{ с.}$$

Приложение 4
(рекомендуемое)

ПАРАМЕТРЫ ВУВ ПРИ РАЗРУШЕНИИ РЕЗЕРВУАРОВ СО СЖАТЫМ ГАЗОМ

Исходными данными для оценки параметров ВУВ являются: давление газа в сосуде в момент разрушения P_1 , кПа, скорость звука в газе внутри сосуда a_1 , м/с, g_1 - показатель адиабаты газа, P_0 - атмосферное давление; a_0 - скорость звука в воздухе. Оценка параметров ВУВ ведется графо-аналитическим методом в следующем порядке.

1. Величина давления на фронте ВУВ ΔP_{ϕ} в момент разрушения сосуда определяется с использованием графиков зависимостей $(a_1/a_0)^2 = f(P_1/P_0)$, изображенных на рис. 4.1 и 4.2.

Каждой кривой на рис. 4.1 и 4.2 соответствует определенное значение DP_{ϕ}/P_0 , обозначенное рядом с кривой. Процедура определения сводится к нахождению кривой, ближайшей к точке с координатами $\{P_1/P_0; (a_1/a_0)^2\}$, где значения a_1 и P_1 отвечают условиям конкретной задачи.

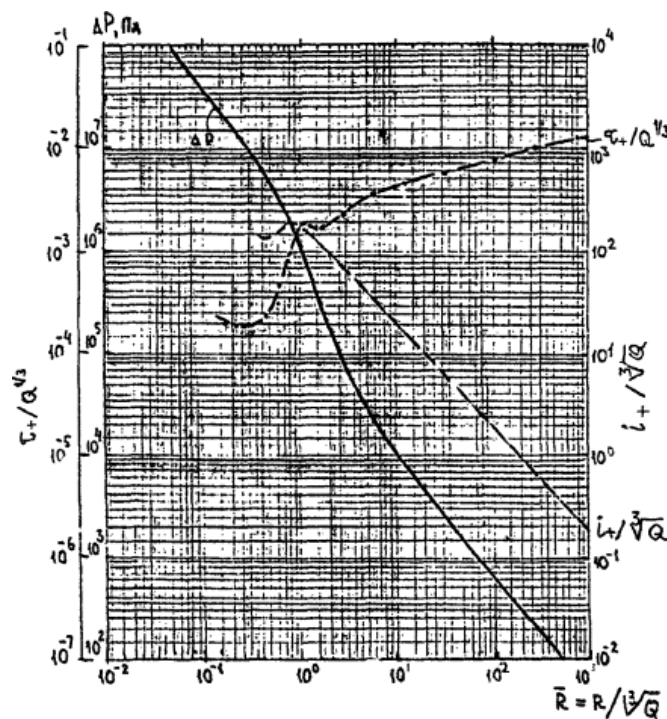


Рис. 3.1. Параметры ВУВ для ТНТ

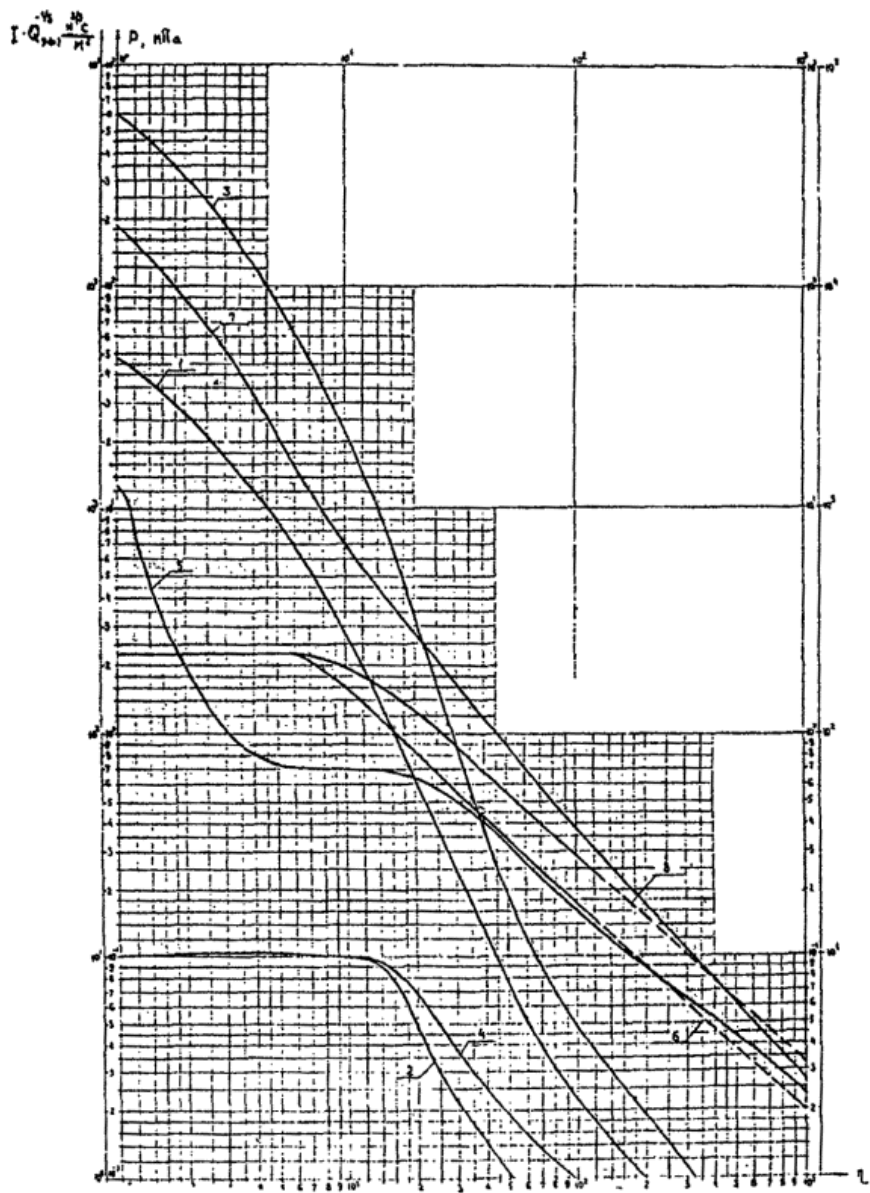


Рис. 3.2. Силовые параметры ВУВ для произвольного ВВ

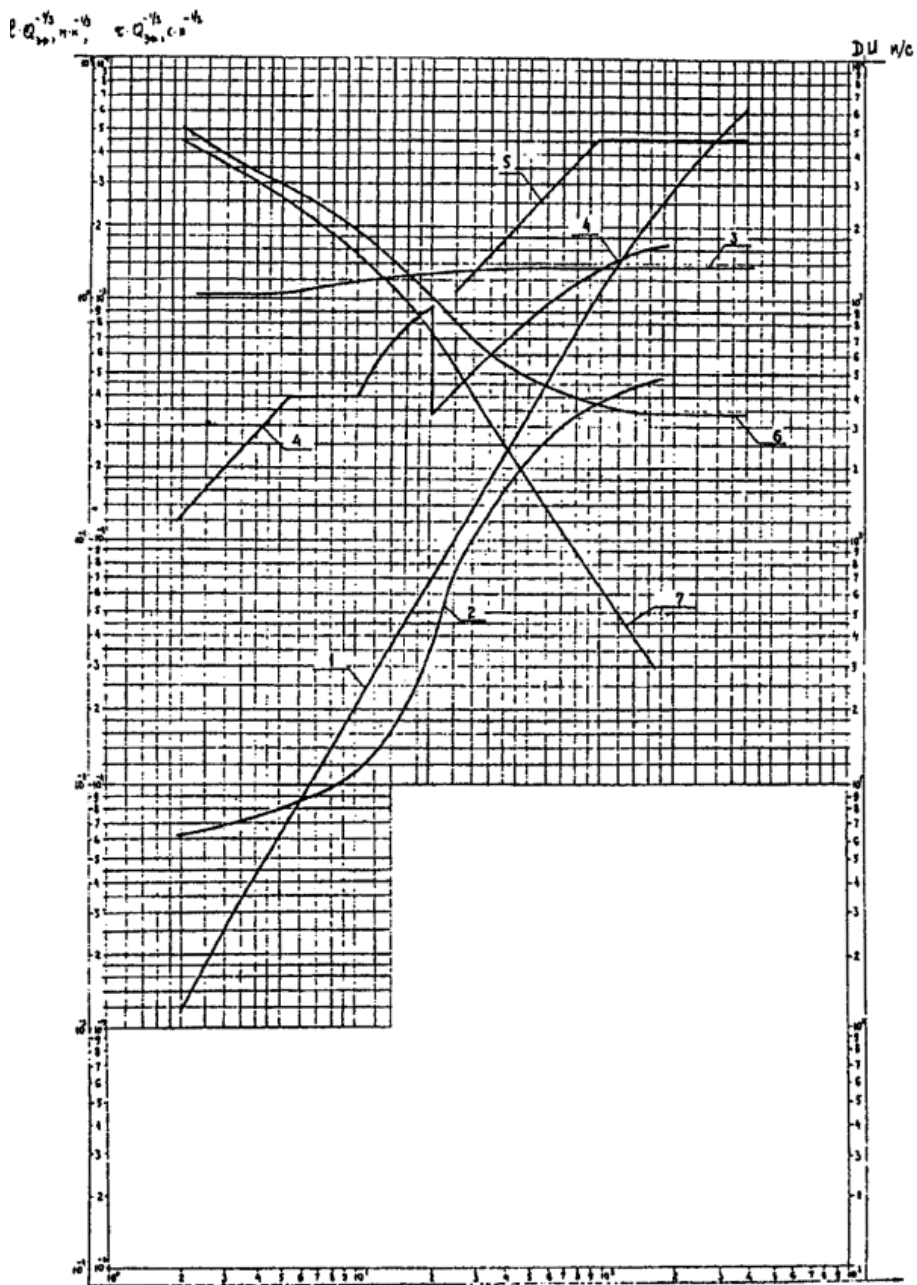


Рис. 3.3 Временные характеристики для произвольного ВВ

Величина a_1 рассчитывается по формуле адиабатического приближения:

$$a_1 = 91,18 \sqrt{\gamma_1 T_1 / \mu} \quad (4.1)$$

В формуле (4.1) T_1 - температура газа в сосуде в момент его разрушения; μ - молекулярный вес газа в сосуде, определяется из табл. 5.1; γ_1 зависит от температуры T и избыточного давления P . В табл. 4.1 приведены значения дробной части $\{a\}$ показателя адиабаты g_1 газов, находящихся под давлением, при некоторых значениях T и P . Среди реальных газов исключение составляет гелий, для которого в интервале $T = 273-1473$ °K величина $g_1 = \text{const} = 1,67$.

Чтобы с помощью таблицы получить истинное значение, надо разделить $\{a\}$ на 1000 и прибавить к полученному результату единицу*.

* Например, для азота при $T = 300$ °K и $P = 100$ атм из табл. 4.1 $\{a\} = 566$; следовательно, $g_1 = 1 + 566/1000 = 1,566$.

2. Приведенная в п.1. процедура определения DP_{Φ} непосредственно осуществляется в случае, если значение g_1 лежит в интервалах $[1,33-1,47]$ и $[1,58-1,75]$; при этом используются графики рис. 4.1 и 4.2, соответственно. Если значение g_1 лежит вне данных интервалов, то величина DP_{Φ} находится из решения следующего трансцендентного уравнения [4, т. 1, стр. 136]:

$$R_1 / P_0 = \frac{\Delta P_{\Phi}}{P_0} \left\{ 1 - \frac{a_0 (\Delta P_{\Phi} / P_0 - 1) (\gamma_1 - 1)}{a_1 \sqrt{2\gamma_0 [2\gamma_0 + (\gamma_1 + 1) (\Delta P_{\Phi} / P_0 - 1)]}} \right\}^{\frac{2\gamma_1}{\gamma_1 - 1}}$$

где g_0 - показатель адиабаты воздуха. При решении данного уравнения следует использовать метод последовательных приближений.

Газ	Температура	Давление P, атм			газ	температура	Давление P, атм		
	T	1	10	100			T	1	10
Азот	300	401	417	566	Аммиак	320	308	410	-
	500	391	396	437		400	277	315	-
	1000	341	342	347		530	230	243	333
Аргон	300	670	697	960	Ацетилен	280	247	339	-
	500	668	676	753		300	233	299	-
	600	667	673	721		320	221	273	-
Водород	270	410	413	427	Воздух	300	402	418	571
	300	405	406	417		600	376	379	404
	500	397	397	398		300	143	-	-
Кислород	300	396	414	599	Пропан	360	109	147	-
	500	366	371	420		400	097	174	-
	700	337	339	353		600	069	074	150
двуокись углерода	300	393	352	-	Окись углерода	280	402	424	698
	400	254	276	630		400	396	406	494
	600	214	229	291		600	376	331	409

Если сосуд разрушается после полного сгорания (детонации) смесей газов (паров топлива) с воздухом, то параметры продуктов взрыва надо принимать согласно табл. 5.1.

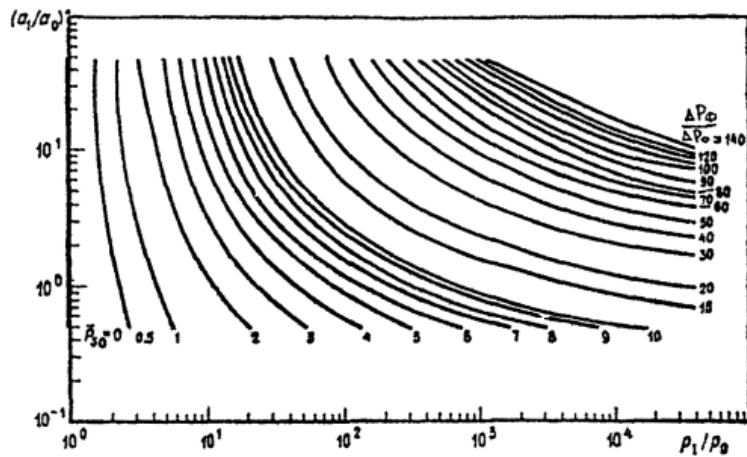


Рис 4.1. Зависимости $(a_1/a_0)^2$ от p_1/p_0 при различных значениях P_0 для газов с $g_1 = 1,4$

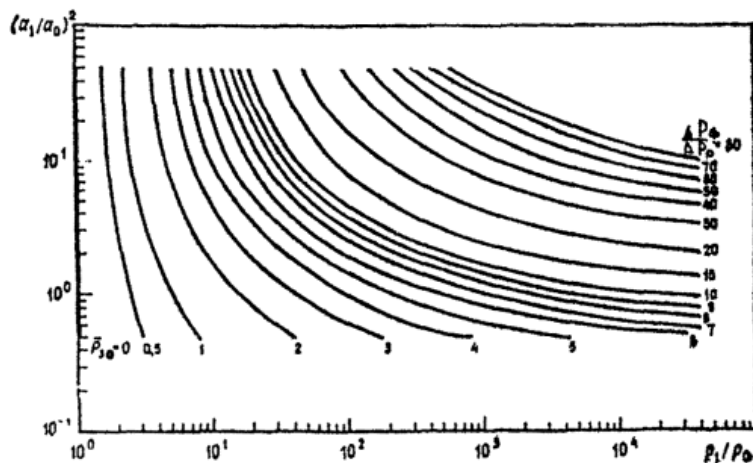


Рис 4.2. Зависимости $(a_1/a_0)^2$ от p_1/p_0 при различных значениях P_0 для газов с $g = 1,4$

3. Рассчитывается приведенный радиус \bar{R}_0 эквивалентного сферического сосуда и потенциальная энергия E в сосуде по формуле:

$$E = V_p (P_1 - P_0) / (g_1 - 1) \text{ кДж}, \quad (4.2)$$

$$\bar{R}_0 = r_c (P_0/E)^{1/3}, \quad (4.3)$$

где: V_p - фактический объем сосуда, м; $r_c = 0,62 V_p^{1/3}$; r_c - радиус сферического сосуда объемом, равным V_p .

4. Определяется DP_ϕ на заданном расстоянии R с использованием графиков $DP_\phi/P_0 = f(\bar{R})$, изображенных на рис. 4.3. Приведенное расстояние \bar{R} рассчитывается по формуле (4.3), в которой r_c надо заменить на R .

Для нахождения DP_ϕ :

а) находится на рис. 4.3 точка с координатами (\bar{R}_0 ; DP_{ϕ}/P_0);

б) проводится из этой точки кривая, "параллельная" ближайшей к ней кривой рисунка. Значение DP_{ϕ}/P_0 (и соответственно DP_{ϕ}) находится на пересечении построенной кривой с линией $\bar{R} = \text{const}$.

5. Величина удельного импульса ВУВ i_+ на заданном расстоянии R определяется по графику зависимости приведенного импульса \bar{i}_+ от приведенного расстояния (см. рис. 4.4), где \bar{i}_+ рассчитывается по формуле:

$$\bar{i}_+ = i_+ a_0 / (P_0^2 - E)^{1/3}. \quad (4.4)$$

6. Метод расчета используется для оценки параметров ВУВ в случае:

а) разрушения сосудов со сжатыми или сжиженными газами, (воздух, азот и т.п.), находящимися под высоким давлением;

б) дефлаграционного взрыва газо- или паровоздушных смесей в емкостях, не рассчитанных на повышенное внутреннее давление (например, емкости для хранения бензина, мазута и т.п.).

Метод дает верхнюю оценку параметров ВУВ в случае (а) и наиболее вероятную - в случае (б). В качестве расчетной величины внутреннего избыточного давления на момент разрушения сосуда принимаются: в случае (а) - умноженное на коэффициент запаса 1,2 избыточное давление опрессовки сосуда (для автомобильных и железнодорожных цистерн для перевозки сжиженных газов это давление » 2,4 МПа), в случае (б) - фактическая прочность сосуда, определяемая предельной расчетной величиной внутреннего избыточного давления, при котором сосуд разрушается. При отсутствии данных в случае (б) принимается $DP_{\phi} = 40$ кПа (усредненное значение по результатам гидравлических испытаний).

Рис. 4.3. Расчетные зависимости $\frac{\Delta P_{\phi}}{P_0}$ от \bar{R}

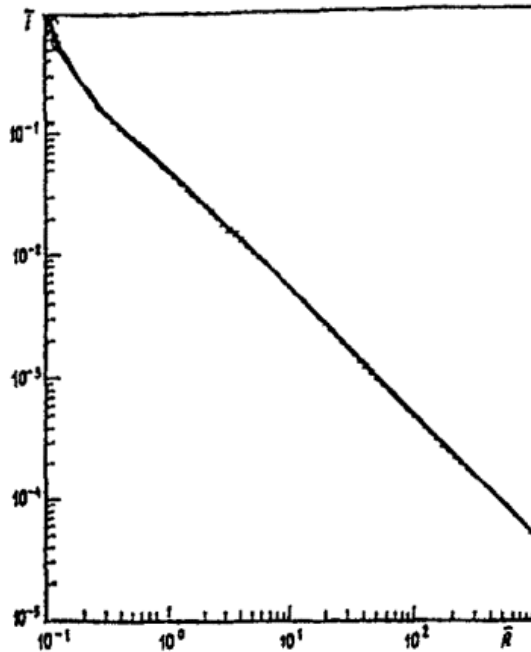


Рис. 4.4. Расчетная зависимость t от R

Пример расчета. Определить величины DP_{ϕ} и i при взрыве ресивера, находящегося на расстоянии 10 м, с объемом $V_p = 6,8 \text{ м}^3$; содержащего азот при давлении $P_1 = 1,013 \text{ МПа}$ (10 атм) и температуре $T_1 = 300 \text{ }^\circ\text{К}$.

Порядок расчета.

Расчет DP_{ϕ}

1. Вычисляем E , \bar{R}_0 и \bar{R} по формулам (4.2)-(4.3).

$$E = 6,8 (1,013 \cdot 10^6 - 1,013 \cdot 10^5) / (1,417 - 1,0) = 14,9 \text{ МДж.}$$

$$\bar{R}_0 = 0,62 (6,8 \cdot 1,013 \cdot 10^5 / (1,49 \cdot 10^7))^{1/3} = 0,222.$$

$$\bar{R} = 10 \cdot (1,013 \cdot 10^5 / (1,49 \cdot 10^7))^{1/3} = 1,89$$

2. Из табл. 4.1 для азота при заданных P и T находим $g_1 = 1,417$, следовательно, можно непосредственно использовать рис. 4.1. По его графикам определяем DP_{ϕ} . Поскольку $T_1 = 300 \text{ }^\circ\text{К}$, то по формуле (4.1) получаем $a_1 = 335,9$. Скорость звука в воздухе $a_0 = 340 \text{ м/с}$. Для точки с координатами $\{P_1/P_0 = 10; (a_1/a_0)^2 = 0,976\}$ находим, что ближайшая кривая отвечает значению $DP_{\phi} = 1,7 \cdot P_0 = 172 \text{ кПа}$.

3. По графикам рис. 4.3 определяем, что точка с координатами $\{R_0 = 0,222; DP_{\phi}/P_0 = 1,7\}$ находится вблизи третьей снизу кривой.

Спускаясь "параллельно" этой кривой до пересечения с абсциссой $\bar{R}_0 = 1,89$, находим при $R = 10 \text{ м}$

$$DP_{\phi}/P_0 = 0,15; DP_{\phi} = 0,15 \cdot 101,3 = 15,2 \text{ кПа.}$$

Расчет импульса.

Для $\bar{R} = 1,89$ по графику рис. 4.4 находим $\bar{i}_+ = 1,6 \cdot 10 \text{ с}$.

Определяем импульс из формулы (4.4):

$$i = 1,6 \cdot 10^{-2} \cdot (1,013 \cdot 10^5)^{2/3} \cdot (1,49 \cdot 10^7)^{1/3} / 334 = 25,6 \text{ Па} \cdot \text{с.}$$

Приложение 5

(рекомендуемое)

ПАРАМЕТРЫ ВУВ ПРИ ВЗРЫВЕ ОБЛАКОВ ГВС (ТВС)

Облака газо- или топливно-воздушных смесей образуются при разливе и/или испарении газов и топлив. Взрывоопасность испарившегося вещества можно определить по справочнику [22] и по ГОСТ 12.1.004-84 "Пожаровзрывоопасность - веществ и материалов". При авариях различного рода емкостей происходит их разгерметизация и перемешивание взрывоопасных веществ с воздухом. В результате создается облако ГВС (или ТВС), в котором при определенных условиях может развиваться детонационный или дефлаграционный взрыв, генерирующий ВУВ. В Руководстве приняты следующие допущения:

1. Концентрация горючего компонента в ТВС (ГВС) соответствует стехиометрической смеси, т.е. максимально возможному количеству сгораемого горючего (и, следовательно, максимальному энерговыделению).
2. Во взрывном процессе участвует вся масса горючего, выделившегося в облако.

Значения величин концентрации горючего в стехиометрической смеси $C_{смх}$, нижнего концентрационного предела воспламенения $C_{нклв}$ и другие необходимые для расчетов характеристики приведены в табл. 5.1.

Поскольку тип взрывного процесса в облаке ГВС (или ТВС) заранее неизвестен, то для получения консервативных оценок в каждом конкретном случае оцениваются параметры ВУВ в функции от расстояния как при детонационном, так и при дефлаграционном взрывах. В зависимости от принятого критерия устойчивости здания или сооружения (в терминах проходящей ВУВ критериями могут быть избыточное давление, импульс или их комбинация) в качестве консервативного принимается вариант, соответствующий максимальным значениям указанных параметров.

Аварийный взрыв облака ТВС (или ГВС) рассматривается как наземный. Принимается, что облако имеет форму полусферы объемом $V_{ТВС}$ с и радиусом r_0 , равными:

$$V_{ТВС} = \frac{2240 \chi M_T T}{\mu C_{смк} T_0} \text{ , м}^3 \quad (5.1)$$

$$r_0 = 0,783 \sqrt[3]{V_{ТВС}} \text{ , м} \quad (5.2)$$

где: M_T - масса исходного топлива, кг; χ - доля массы исходного топлива, переходящего в облако ТВС (принимается по таблице 5.2); T - температура окружающей среды, °К; $T_0 = 273$ °К; μ - молекулярная масса горючего, см. табл. 5.1.

В пределах облака ТВС давление на фронте детонационной волны:

$$P_{дет} = 2,586 (g_l - 1) q_m \text{ , кПа}$$

где: g_l - показатель адиабаты исходной смеси, q_m - удельная массовая энергия взрыва, кДж/кг (определяются по табл. 5.1). Избыточное давление на фронте детонационной волны:

$$DP_{дет} = P_{дет} - P_0$$

где P_0 - атмосферное давление

Таблица 5.1

Характеристики горючих компонентов ГВС и ТВС

Горючее (топливо)	Удельная энергия взрыва стехиометрической смеси		Показатель адиабаты стехиометрической смеси	Концентрация горючего в стехиометрической смеси $C_{стх}$ %	$C_{нкпв}$ воспламенения (об) %	Молекулярная стехиометрической масса	Плотность исходной смеси $P_{стх}$ кг/м
	массовая q_m , кДж/кг	объемная q_v , кДж/м					
Водород	3425	3195	1,248	29,59	4	2	0,933
Метан	2763	3404	1,256	9,45	5	16	1,232
Этан	2797	3496	1,257	5,66	2,9	30	1,25
Пропан	2801	3676	1,257	4,03	2,1	44	1,315
Бутан	2776	3684	1,270	3,13	1,8	58	1,328
Ацетилен	3387	4329	1,259	7,75	2,5	26	1,278
Этилен	3010	3869	1,259	6,54	3,0	28	1,285
Пропилен	2922	3839	1,259	4,46	2,2	42	1,314
Бутилен	2892	3843	1,260	3,38	1,6	56	1,329
Бензол	2937	3966	1,261	2,84	1,4	78	1,350
Толуол	2843	3838	1,260	2,23	1,3	92	1,350
Циклогексан	2797	3748	1,248	2,23	1,2	34	1,340
Метанол	2843	3696	1,253	12,30	6,0	32	1,300
Этанол	2804	3757	1,256	6,54	3,6	46	1,340
Ацетон	3112	3766	1,259	4,99	2,2	42	1,21
Аммиак	2365	2791	1,248	19,72	15,0	17	1,18
Окись углерода	2930	3750	1,256	29,59	12,5	28	1,28
Эфир диэтиловый	2840	3862	1,261	3,38	1,7	74	1,36
Дихлорэтан	2164	3224	1,265	6,54	3,6	99	1,49
Бензин	2973	3770	-	2,1	1,2	53	1,275

Таблица 5.2

Доля массы исходного горючего вещества в облаке ТВС

№	Тип и состояние горючего вещества	χ
1	Газы при атмосферном давлении	1,0
2	Газы под давлением*	0,6-0,7
3	Газы, сжиженные под давлением*	0,5
4	Газы, сжиженные путем охлаждения*	0,1
5	Разлитые легкоиспаряющиеся жидкости (бензин, керосин, дизельное топливо) и водород в состоянии, обозначенном в п/п 2-4	0,05
6	Разлитые тяжелоиспаряющиеся жидкости (масла, концентрат аммиачной воды)	0,01

* Кроме водорода

В результате детонации ТВС за пределами облака распространяется ВУВ, $DP_{ф}$ и t_+ являются функциями расстояния R ($R > r_0$) и энергий взрыва $E_{ув}$, перешедшей в ВУВ:

$$E_{ув} = 2 h q_v V_{Тес} \quad (5.3)$$

где: $h = 1 - (2 P_0 / P_{дет})^{(g_l - 1) / g_l}$ - доля полной энергии взрыва, перешедшей в ВУВ.

В зависимости от интервала значений приведенных расстояний

$$\bar{R} = R (E_{yB})^{-1/3}, \text{ м/кДж} \quad (5.4)$$

величины DP_{ϕ} и t_+ рассчитываются по формулам:

при $0,05 < \bar{R} \leq 0,068$:

$$DP_{\phi} = 1,227 \cdot 10^{-6} / \bar{R}^{4,68} + 0,49, \text{ кПа}; \quad (5.5)$$

при $0,068 < \bar{R} \leq 0,31$:

$$DP_{\phi} = 4,156 / \bar{R}^{1,7}; \text{ кПа} \quad (5.6)$$

При $R > 0,31$:

при $\bar{R} > 0,31$

$$DP_{\phi} = 4,96 / \bar{R} + 0,974 / \bar{R}^2 + 0,146 / \bar{R}^3, \text{ кПа}; \quad (5.7)$$

при $0,052 \leq \bar{R} < 0,434$:

$$t_+ = 0,323 \sqrt{\bar{R}} \sqrt[3]{E_{yB}}, \text{ мс}; \quad (5.8)$$

при $\bar{R} > 0,434$:

$$t_+ = 0,0209 \sqrt{\bar{R}} \sqrt[3]{E_{yB}} (6,634 - \bar{R})^{1,5}, \quad (5.9)$$

Под действием ветра облако ТВС или ГВС переносится от центра его образования на расстояние DL , м, причем при консервативных оценках принято считать, что снос облака происходит в направлении объекта (за исключением водородно-воздушных смесей, для которых снос облака из-за быстрого его "рассасывания" учитывать не следует). Величина DL рассчитывается по формуле:

$$DL = (0,44 r_0/a)^{1/k},$$

где значения коэффициентов, a и k в зависимости от наиболее вероятного состояния атмосферы по данным наблюдений на объекте определяются с помощью данных табл. 5.3 и 5.4.

С учетом сноса облака эффективное расстояние r , м, от потенциального источника ВУВ до рассматриваемой точки на объекте:

$$r = \begin{cases} R - \Delta L, & \text{если } R \geq \Delta L. \\ 0, & \text{если } R < \Delta L. \end{cases}$$

Таблица 5.3

Значения коэффициентов a и k

Класс устойчивости атмосферы по Пасквиллу	a	k
A	0,43	0,89
B	0,26	0,92
C	0,20	0,92
D	0,13	0,92
E	0,08	0,94
F	0,05	0,94

В отличие от детонационного взрыва ТВС дефлаграционный взрыв генерирует ВУВ, существенно меньшую по амплитуде, но большую по длительности. Нагрузки от ВУВ дефлаграционного взрыва воспринимаются строительными конструкциями как квазистатические, поэтому для оценки воздействия такой ВУВ достаточен расчет только ее максимального давления как функции расстояния $DR_{\text{м}}(R)$ за пределами облака. Зависимость $DR_{\text{м}}(R)$ для наземного дефлаграционного взрыва полусферического облака ТВС рассчитывается по формуле:

$$\Delta P_{\text{м}}(R) = \frac{\Delta P_{\text{мmax}}}{1 + G(R/R_{\text{вр}} - 1)^H}, \quad (5.10)$$

Таблица 5.4

Классификация и характеристика устойчивости атмосферы

Класс устойчивости атмосферы	Характеристика устойчивости атмосферы	Состояние атмосферы	Типичная скорость ветра, м/с
A	Очень сильно развитая конвекция	Солнечно и жарко	1
B	Неустойчивое состояние, умеренная конвекция	Солнечно и тепло	2
C	Слегка неустойчивое состояние, слабая конвекция	Переменная облачность в течение дня	5
D	Нейтральное состояние	Облачно	5
E	Почти устойчивое состояние, слабая инверсия	Переменная облачность в течение ночи	3
F	Устойчивое состояние, умеренная инверсия	Ясная ночь	2

где $\Delta P_{\text{мmax}} = 2,1 P_0 \frac{(w/a_0)^2}{1 + w/a_0}$ - максимальное избыточное давление ВУВ в пределах облака, кПа; w - скорость фронта пламени, м/с; $a_0 = 340$ м/с - скорость звука в воздухе при нормальных условиях; $R_{\text{вр}} = \sqrt[3]{\sigma}$ - радиус облака после окончания горения, м; r - определяется по

формуле (5.2); величина $V_{ТВС}$, входящая в (5.2), - по формуле, аналогичной формуле (5.1), в которой параметр $C_{стх}$ заменен на $C_{нкпв}$; $b = 4 + 4C_{нкпв}/C_{стх}$ - степень расширения продуктов взрыва; значения констант G и H принимаются по табл. 5.5.

Таблица 5.5

Значения констант G и H в формуле

w/a_0	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
G	0,588	0,567	0,687	0,546	0,467
H	1,146	1,146	1,0	1,048	1,14

При аварийных дефлаграционных взрывах величина скорости w , полученная в результате оценок последствий аварий, соответствует интервалу 100-200 м/с. Конкретная величина этого параметра принимается на основе дополнительной информации, либо равной 200 м/с (смотри также приложение 2).

При дефлаграционном взрыве ТВС в резервуаре, не являющимся специальным сосудом высокого давления, разрушение такого резервуара происходит при относительно небольшом внутреннем давлении. Поэтому к моменту разрушения прореагирует только небольшая (5-10 %) часть ТВС, и фактически в этот момент резервуар содержит ненагретый сжатый газ. Расширение этого газа при разрушении резервуара приводит к образованию ВУВ, начальное избыточное давление $DP_{ф}$ на фронте которой определяется по методике приложения 4; при распространении ВУВ давление на ее фронте описывается зависимостью акустического приближения

$$DP_{ф}(R) = DP_{ф} r_0/R, \text{ кПа}$$

где r_0 - определяется по формуле (5.2), в которой вместо величины $V_{ТВС}$ необходимо брать V_p - объем резервуара.

Пример расчета 1. Определить расстояние, на котором избыточное давление на фронте ВУВ, генерированной при наземном детонационном взрыве облака стехиометрической водородовоздушной смеси, падает до величины $DP_{ф} = 1$ кг/см. Облако образуется при разрушении ресивера, содержащего 18,66 кг водорода. Из табл. 5.1 и 5.2 находим: $\gamma = 0,7$, $g_1 = 1,248$, $m = 2$, $q_m = 3435$ кДж/кг, $q_v = 3195$ кДж/м, $C_{стх} = 29,6$ %.

Находим объем исходного облака

$$V_{ТВС} = 2240 \cdot 18,66 \cdot 0,7 / (2 \cdot 29,6) = 494,2 \text{ м}^3$$

Давление на фронте детонационной волны

$$P_{дет} = 2,586 \cdot (1,248 - 1) \cdot 3425 = 2197 \text{ кПа};$$

доля энергии взрыва, перешедшей в ВУВ

$$\eta = 1 - \left(\frac{2 \cdot 101,3}{2197} \right)^{\frac{1,248-1}{1,248}} = 0,38;$$

энергия взрыва, переходящая в ВУВ при наземном взрыве

$$E_{ув} = 2 \cdot 0,38 \cdot 3195 \cdot 494,2 = 1,2 \cdot 10^6 \text{ кДж}$$

В связи с тем, что заданное значение $DP_{ф}$, равное 1 кПа, соответствует дальней зоне, для нахождения величины R используем формулы 5.7 и 5.4, подставляя известные значения параметров $DP_{ф}$ и $E_{ув}$, получаем кубическое уравнение относительно R , действительный корень которого равен 500 м.

Пример расчета 2. Определить то же расстояние, что и в примере 1, для дефлаграционного взрыва облака. Исходные данные для расчета - те же, что в примере 1 (исключение составляет концентрация водорода в облаке, соответствующая нижнему концентрационному пределу воспламенения). Принимаем скорость фронта пламени w равной 200 м/с. По табл. 5.5 находим $G = 0,467$ и $H = 1,14$. Далее находим $s = 4,54$, $r_0 = 12$ м, $R_{нг} = 19,9$ м и $DP_{max} = 47,9$ кПа. Подставляя в формулу (5.10) значение $DP_{ф}(r)$, равное 1 кПа, и решая уравнение, находим расстояние $R = 1100$ м.

Приложение 6

(рекомендуемое)

ПАРАМЕТРЫ ВУВ ПРИ ВЗРЫВЕ ГВС (ТВС) В ПОДЗЕМНОМ РЕЗЕРВУАРЕ

Физическая природа взрыва ГВС или ТВС при аварии в подземном резервуаре такая же, как и при взрыве взрывоопасного облака в воздухе (см. приложение 5). Исходные данные - объем резервуара V_p , м³, толщина слоя грунта $\Delta h_{гр}$, м, толщина стенок резервуара $\delta_{ст}$, м, плотность грунта $\rho_{гр}$, кг/м³, и стенок $\rho_{ст}$, кг/м³, а также расстояние R , м от резервуара до ОИАЭ и тип газа.

Избыточное давление на фронте ВУВ рассчитывается по эмпирической зависимости:

$$\Delta P_{ф}(R) = 37,5 \alpha_p \rho_{ст} \sqrt[3]{B} \left[\frac{\sqrt[3]{V_p}}{R} \right]^{2,07}, \text{ кПа}, \quad (6.1)$$

где: $\rho_{стх}$ - плотность стехиометрической смеси (см. табл. 5.3), кг/м³;

$$B = \sqrt[3]{V_p} \cdot l \left(\Delta h_{гр} + \delta_{ст} \frac{\rho_{ст}}{\rho_{гр}} \right)$$

α_p - эмпирический коэффициент (для углеводородных ГВС рекомендуется принимать значение α_p равным 3,46).

Пример. Определить параметры ВУВ при взрыве паров пропана в подземном резервуаре объемом 50 м³ (стенки толщиной 5 · 10⁻³ м из стали), расположенном на глубине 1,5 м на расстоянии 12 м от центра резервуара.

Порядок расчета. Для рассматриваемого резервуара принято:

$$r_{стх} = 1,315 \text{ кг/м}^3; \quad r_{ст} = 7800 \text{ кг/м}^3; \quad r_{гр} = 1850 \text{ кг/м}^3; \quad \sqrt[3]{V_p} = 3,37$$

По формуле (6.1) получаем:

$$\Delta P_{\phi} = 37,5 \times 1,375 \times 3,46 \times \left(3,37 \times (1,5 + 7800 \times 5 \times 10^{-3} / 1850) \right)^{1/3} \left[\frac{3,37}{12} \right]^{2,07} = 10 \text{ кПа.}$$

**Приложение 7
(рекомендуемое)**

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЛЕТАЩИХ ПРЕДМЕТОВ ПРИ ВЗРЫВАХ

1. Метод расчета скоростей осколков, образующихся при взрыве сферических и цилиндрических оболочек, базируется на следующих основных предположениях и допущениях:

1) сосуд высокого давления разрушается на одинаковые фрагменты (осколки). В случае только двух фрагментов и сосуда цилиндрической формы осколки будут разлетаться в противоположные стороны вдоль оси симметрии сосуда. Если число фрагментов велико, а форма сосуда цилиндрическая, то осколки имеют удлинненную форму (влиянием днищ сосуда пренебрегается) и будут разлетаться в радиальном направлении от оси цилиндра;

2) стенки сосуда имеют равномерную толщину;

3) в случае цилиндрических сосудов отношение их длины L к диаметру D велико ($L/D = 10$), а для сферических сосудов $L/D = 1$;

4) внутри сосуда могут находиться азот, аргон, водород, воздух, гелий или двуокись углерода, давление в сосуде может превышать 1000 кПа;

5) для сосудов, изготовленных из вязкопластичных материалов (дюралюминий), число осколков $N = 2 + 10$, для прочных сосудов (нержавеющая сталь) $N \gg 100$, для каменной кладки и хрупких материалов, например, стекла, N весьма велико. Принимается, что при взрыве образуются осколки одинаковых размеров и массы.

Для оценки скорости осколков, образующихся при разрушении сферических или цилиндрических сосудов на одинаковые фрагменты, необходимо знать внутреннее давление в сосуде P , объем сосуда V_0 , массу оболочки M_c и абсолютную температуру газа T_0 в начальный момент времени.

Процедура определения скорости осколков, образующихся при взрывном разрушении тонкостенных сферических и цилиндрических сосудов, заключается в следующем.

1. Сначала рассчитывается приведенное давление:

$$\bar{P} = \frac{(P - P_0)V_0}{M_c a_1^2}, \quad (7.1)$$

2. По зависимостям на рис. 7.1 определяется соответствующее значение приведенной скорости:

$$\bar{U} = \frac{U}{a_1}, \quad (7.2)$$

откуда находится требуемая скорость осколка U .

В формулы (7.1)-(7.2) входят следующие параметры: P_0 - атмосферное давление, зависящее в общем случае от высоты h_0 данного объекта над уровнем моря (график этой зависимости представлен на рис. 7.2); a_1 - скорость звука в газе, определяемая по формуле (4.1) при температуре $T_1 = T_0$.

2. Для ударных волн промежуточной интенсивности ($P/P_0 < 3,5$) значение скорости, которую может приобрести в результате воздействия ВУВ от взрыва незакрепленный вторичный осколок (далее в пределах пункта - тело), оценивается с помощью графиков на рис. 7.3, на котором по оси абсцисс отложены значения приведенного импульса ВУВ:

$$\bar{i} = C_D i a_0 \left[\Delta P_{\phi} (KH + X) \right], \quad (7.3)$$

а по оси ординат - значения безразмерного давления;

$$\bar{P} = \Delta P_{\phi} / P_0 \quad (7.4)$$

Кривые на рис. 7.3 соответствуют равным значениям приведенной скорости:

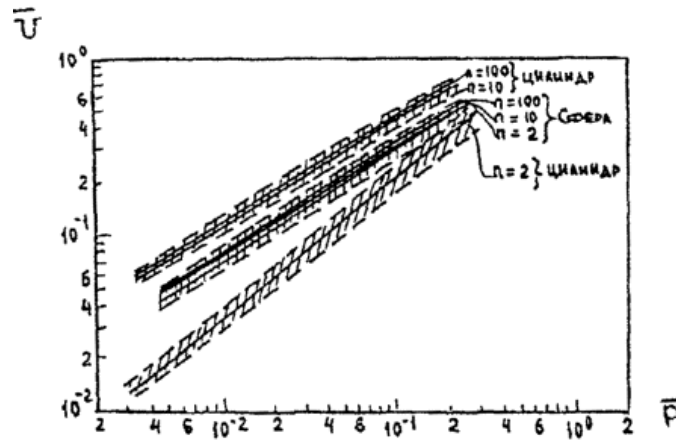


Рис. 7.1. Зависимость приведенной скорости осколков \bar{U} от приведенного давления \bar{P}

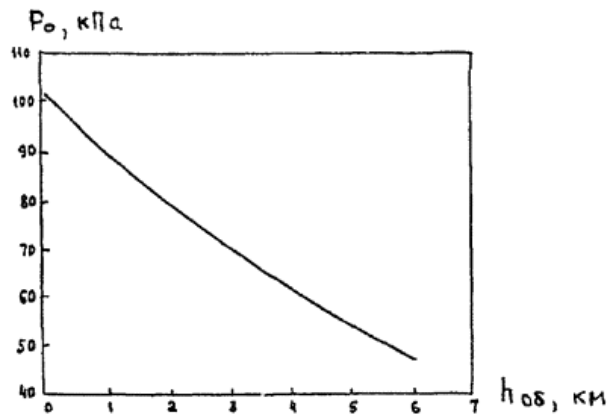


Рис. 7.2. Зависимость атмосферного давления P_0 высоты отсчета h_{0B} над уровнем моря

$$\bar{U} = \frac{M U a_0}{P_0 A (KH + X)} \tag{7.5}$$

Обозначения в соотношениях (7.3)-(7.5): M - масса осколка; U - скорость осколка; a_0 - скорость звука в воздухе; A - площадь поперечного сечения тела; K - постоянная, $K = 4$ (или 2) - для вторичного осколка, находящегося на поверхности земли (соответственно, в воздухе); H - минимальный поперечный размер тела в среднем сечении; X - расстояние от фронтальной точки на поверхности тела до наибольшего по площади его поперечного сечения (см. рис. 7.4), DP_{ϕ} - амплитуда падающей на тело ВУВ, C_D - коэффициент лобового сопротивления тела (см. табл. 7.1).

Процедура определения скоростей вторичных осколков аналогична процедуре, приведенной в п. 1:

- 1) по \bar{i} и \bar{P} находим \bar{U} ;
- 2) по формуле (7.5) определяем U .
3. Метод расчета максимальной дальности разлета осколков базируется на следующих предпосылках и допущениях:
 - а) осколок движется в одной плоскости и может вращаться вокруг вертикальной оси;
 - б) большинство осколков, получаемых при взрывах, имеют неправильную форму и имеют коэффициент подъемной силы C_L , равный 0 (соответственно, C_{LD} близок к нулю);
 - в) для некоторых видов вторичных осколков (плиты, пластины) влияние подъемной силы существенно.

В дальнейшем используются обозначения, приведенные на рис. 7.5, на котором изображена плита, движущаяся со скоростью U с углом атаки α_1 . Площадь наибольшей несущей поверхности обозначена A_1 , а коэффициенты подъемной силы и лобового сопротивления - C_{L1} и C_{D1} ; соответственно, для наименьшей несущей поверхности - A_2 , C_{L2} и C_{D2} .

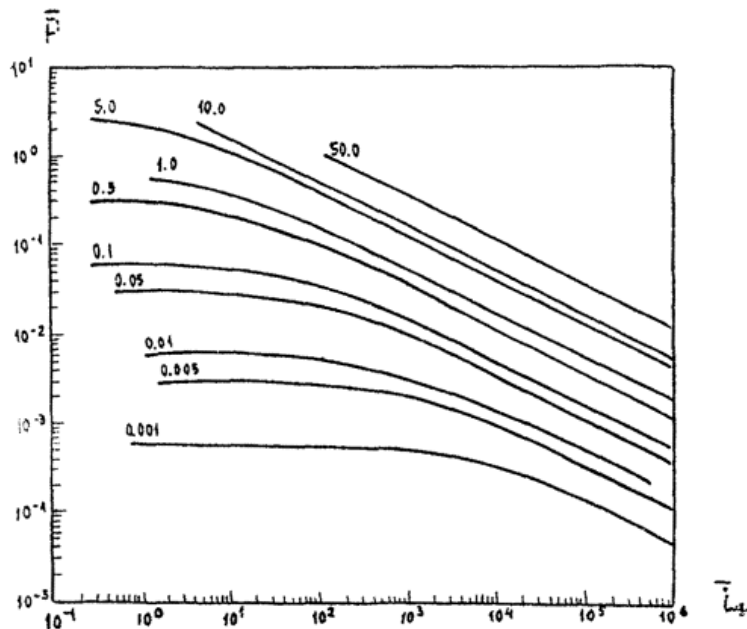


Рис. 7.3. Зависимость безразмерного давления \bar{P} от проведенного импульса i_t при различных значениях приведенной скорости вторичного осколка \bar{V}

Рис. 7.4 Примерная форма вторичного осколка:

а - пространственное изображение; б - фронтальная проекция

Таблица 7.1

Коэффициенты сопротивления C_D для тел различной формы

Форма тела и ориентация	C_D
Правильный круговой цилиндр (длинный стержень), ось которого перпендикулярна направлению потока	1,2
Шар	0,47
Длинный цилиндр, ось которого параллельна направлению потока	0,82
Диск или квадратная пластина, плоскость которых перпендикулярна направлению потока	1,17
Куб, одна из граней которого перпендикулярна потоку	1,05
Куб, натекание на ребро	0,3
Длинная прямоугольная пластина, лобовое натекание на узкую грань	2,05
Длинная прямоугольная пластина, натекание на длинное ребро	1,56
Узкая полоска, плоскость которой перпендикулярна потоку	1,93

Значения коэффициентов подъемной силы и лобового сопротивления приведены в табл. 7.2. Начальная скорость осколка - U_0 , плотность потока - ρ_0 , масса осколка - M , ускорение силы тяжести - g , дальность разлета - R .

При определении максимальной дальности разлета осколков:

1) вычисляется отношение подъемной силы к силе сопротивления:

$$C_{LD} = \frac{C_{D1} A_1 + C_{D2} A_2}{C_{D1} A_1 + C_{D2} A_2}; \quad (7.6)$$

2) находится приведенная скорость осколка:

$$\bar{V} = \frac{\rho_0 (C_{D1} A_1 + C_{D2} A_2) U_0^2}{M g}; \quad (7.7)$$

3) выбирается на рис. 7.6 кривая с ближайшим значением параметра C_{LD} , затем по известному значению приведенной скорости осколка (на горизонтальной оси графика) определяется безразмерная дальность разлета:

Таблица 7.2

Коэффициенты подъемной силы и лобового сопротивления

№ п/п	Угол атаки, α_1 , градус	C_{L1}	C_{D1}	C_{L2}	C_{D2}
1	0	0	0	0	2,05

2	10	0,42	0,075	-0,36	2,02
3	20	0,8	0,29	-0,7	1,93
4	30	1,11	0,64	-1,03	1,78
5	40	1,3	1,09	-1,32	1,57
6	50	0,75	0,9	-1,3	1,09
7	60	0,59	1,01	-1,11	0,64
8	70	0,4	1,1	-0,8	0,29
9	80	0,2	1,15	-0,42	0,075
10	90	0	1,17	0	0
11	100	-0,2	1,15	0,42	0,075
12	110	-0,4	1,1	1,8	0,29
13	120	-0,56	1,01	1,11	0,64
14	130	-0,75	0,9	1,8	1,09
15	140	-1,3	1,09	1,32	1,57
16	150	-1,11	0,64	1,03	1,78
17	160	-0,8	0,29	0,7	1,93
18	170	-0,42	0,075	0,36	2,02

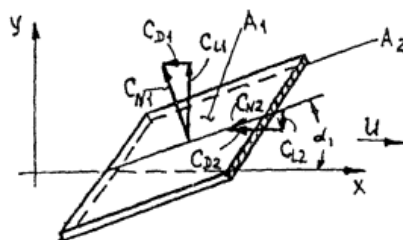


Рис. 7.5. Геометрия сил, действующих на летящую квадратную плиту

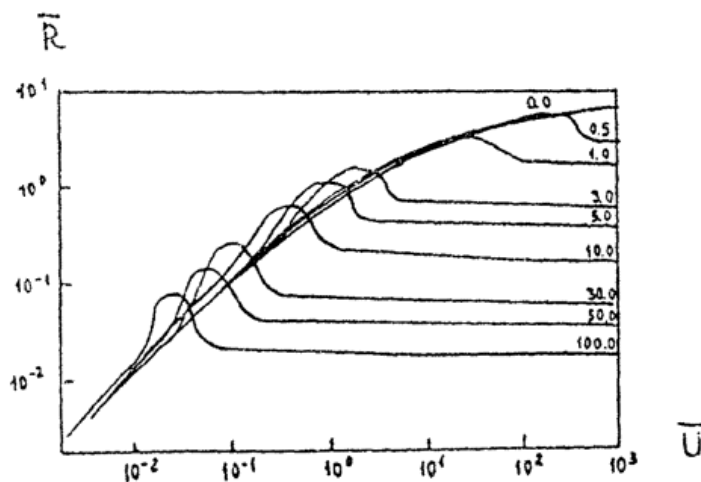


Рис. 7.6. Универсальные зависимости для оценки дальности полета осколков. Цифрами над кривыми обозначены соответствующие значения параметра C_{LD} ;

$$\bar{R} = \frac{\rho_0 (C_{D1} A_1 + C_{D2} A_2) R}{M}, \quad (7.8)$$

после чего определяется дальность разлета осколка R .

Если исходное значение параметра C_{LD} находится между приведенными на графике величинами, то для определения искомой дальности разлета можно воспользоваться линейной интерполяцией.

Пример 1. Цилиндрический сосуд с водородом разрушается на сто одинаковых осколков. Начальные условия: $P - P_0 = 200$ МПа, $T_0 = 300$ °К, $a_1 = 1316$ м/с по формуле (4.1), $M_c = 100$ кг, $V_0 = 6,283 \cdot 10^{-2}$ м³ ($L/D = 10$, $L = 2$ м).

Порядок расчета. Вычисляем значения приведенного давления:

$$P = \frac{20 \times 10^6 \times 6,283 \times 10^{-2}}{100 \times 1316 \times 1316} = 0,72 \times 10^{-2}$$

Соответствующее значение безразмерной скорости для случая цилиндрической симметрии и $n = 100$ (см. рис. 7.1):

$$\bar{U} = 9 \times 10^{-2}, \text{ и окончательно } U = 9 \cdot 10^{-2} \cdot 1316 = 118 \text{ м/с}$$

Пример 2. На тело кубической формы объемом 1 куб. м, находящееся на поверхности земли, падает ВУВ. Начальные условия: $M = 1000$ кг, $a_0 = 340$ м/с, $P_0 = 100$ кПа, $A = 1$ м², $K = 4$, $H = 1$ м, $X = 0$, $DP_{\phi} = 70$ кПа, $C_D = 1,05$ (по табл. 7.1) и $i = 3,5$ кПа×с (т.е. длительность волны составляет 100 мс).

Порядок расчета. Определяем приведенное давление и импульс по соотношениям (7.3) и (7.4):

$$\bar{P} = \frac{70 \times 10^3}{100 \times 10^3} = 0,7; \quad \bar{i} = \frac{1,05 \times 3,5 \times 10^3 \times 340}{70 \times 10^3 \times (4,1 + 0)} = 4,46$$

Из рис. 7.3 путем интерполяции между $\bar{U} = 1$ и $\bar{U} = 5$ находим безразмерную скорость вторичного осколка $\bar{U} = 2,5$. Затем из соотношения (7.5) получаем

$$U = \frac{2,5 \times 100 \times 10^3 (4,1 + 0)}{1000 \times 340} = 2,9 \text{ м/с}$$

Пример 3. Стальная крышка люка метается взрывом под углом атаки 10° . Исходные данные: $U_0 = 5 \text{ м/с}$; $r_0 = 1,293 \text{ кг/м}^3$; $M = 200 \text{ кг}$; $A_1 = 0,5 \text{ м}^2$; $A_2 = 0,04 \text{ м}^2$; $C_{L1} = 0,42$; $C_{L2} = -0,36$; $C_{D1} = 0,075$; $C_{D2} = 2,02$ (см. табл. 7.2); $g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

Порядок расчета. Используя исходные данные и формулы (7.6) и (7.7), делаем шаги 1 и 2:

$$C_{LD} = (0,42 \cdot 0,5 - 0,36 \cdot 0,04) / (0,075 \cdot 0,5 + 2,02 \cdot 0,04) = 1,65$$

$$U = 1,239 \cdot (0,075 \cdot 0,5 + 2,02 \cdot 0,04) \cdot 5^2 / (200 \cdot 9,8) = 2 \cdot 10^{-3}$$

Шаг 3: так как первое значение на оси абсцисс рис. 7.6 равно 0,01, а получившееся значение приведенной скорости меньше этой величины, то в этом случае рекомендуется значение \bar{R} принимать численно равным \bar{U} , следовательно, $\bar{R} = 2 \cdot 10^{-3}$, тогда из формулы (7.8) находим $R = 3 \text{ м}$.

Пример 4. Определить дальность разлета осколка, образовавшегося в результате взрыва сосуда с водородом (пример 1). Форма осколка близка к пластине; предположим, что $\alpha_1 = 20^\circ$, тогда $C_{L1} = 0,8$, $C_{L2} = -0,7$; $C_{D1} = 0,29$; $C_{D2} = 1,93$.

Имеем $A_1 = 625 \text{ см}^2$, $A_2 = 25 \text{ см}^2$, $U_0 = 118 \text{ м/с}$, $M = 1 \text{ кг}$.

Шаг 1: $C_{LD} = (625 \cdot 0,8 - 25 \cdot 0,7) / (625 \cdot 0,29 + 25 \cdot 1,93) = 2,1$

Шаг 2: $\bar{U} = 1,239 \cdot (0,29 \cdot 625 + 1,93 \cdot 25) \cdot 10^{-4} \cdot 118^2 / (1 \cdot 9,81) = 45,2$

Шаг 3: $\bar{R} = 1$, $R = 1 \cdot 1 / ((1,239 \cdot ((0,29 \cdot 625 + 1,93 \cdot 25) \cdot 10^{-4})) = 35 \text{ м}$.

Приложение 8

(справочное)

ПАРАМЕТРЫ СЕЙСМОВЗРЫВНЫХ ВОЛН

В приложении 8 определяются параметры сейсмозрывных волн, распространяющихся в грунтах при взрыве стационарно расположенного ВВ. Энергия остальных источников ВУВ (ВВ на транспортных средствах, ГВС и ТВС, резервуары со сжатым газом, подземные резервуары с ГВС и ТВС) передается практически только в воздушное пространство.

1. Безопасность зданий и сооружений

Безопасность зданий и сооружений обеспечивается при выполнении соотношения

$$u \leq u_{гр} \quad (8.1)$$

где u и $u_{гр}$ - максимальная массовая скорость в грунтовом массиве (на уровне сооружения) и предельно допустимая скорость колебания грунта в основании сооружения.

Максимальная массовая скорость в грунтовом массиве определяется по формуле

$$u = k_u k_m k_q k_h k_n \bar{R}^{-n}, \text{ м/с} \quad (8.2)$$

В формуле (8.2) коэффициенты k_u , k_m , k_q , k_h , и n определяются так:

$$k_u = \left[\frac{1+\nu}{3(1-\nu)} \right]^{2/3} (C_p / \rho)^{1/3}, \quad k_m = \sqrt{[\rho C_p] / [\rho C_p]_{\text{осн}}}$$

$$k_q = \xi \sqrt{Q_{\text{фор}} / (a M_{\text{ВВ}})}, \quad k_h = 1 - \exp(-4(2\bar{x} + 3) / 3), \quad n = 2,21 \bar{R}^{-0,05}$$

где ν - коэффициент Пуассона грунта в месте взрыва; ρ - плотность грунта в месте взрыва, т/м³; C_p - скорость распространения продольных волн в грунте в месте взрыва, м/с; \bar{R} - приведенное расстояние от места взрыва до сооружения, м/кг^{1/3}, определяется по формуле (3.1) Приложения 3; индекс "осн" относится к характеристикам грунтов в основании сооружения; если g и C_p известны в целом для площадки, то принимаем k_m равным единице, а ν - коэффициент, определяемый по табл. 3.1 Приложения 3, $M_{\text{ВВ}}$ - масса ВВ, $Q_{\text{фор}}$ - масса ВВ, равная 1 т; коэффициент k_q необходимо определять, если $a M_{\text{ВВ}}$ отличается от $Q_{\text{фор}}$ более, чем на три порядка, в противном случае $k_q = 1$; $\bar{x} = z_0 / r_{00}$, z_0 - координата центра тяжести ВВ (глубина заложения ВВ, положительна по направлению к центру Земли), r_{00} - радиус эквивалентного сферического заряда, равный $0,062 \sqrt[3]{a M_{\text{ВВ}}}$; при расположении ВВ на поверхности земли принимаем $\bar{x} = -1$.

Коэффициент k_h зависит от уровня грунтовых вод $H_{гр}$ и определяется по табл. 8.1.

Величина предельно допустимой скорости колебания грунта в основании сооружения определяется с учетом разделения объектов по их классу и суммарному рангу.

Класс сооружения определяется степенью его важности. Все здания и сооружения ОИАЭ, важные для безопасности, при оценке воздействия сейсмозрывных волн от аварийных взрывов следует относить к первому классу.

Ко всем оставшимся строениям применима классификация СНИП.

Так, ко второму классу относятся объекты промышленного назначения большой важности, а также гражданские здания с большим скоплением людей, к третьему классу - объекты, аналогичные объектам второго класса, но меньших размеров в плане и меньшей этажности, к четвертому классу - здания гражданского и промышленного строительства, нарушения в которых не угрожают жизни и здоровью людей или повреждению установленного оборудования.

Таблица 8.1

Значение коэффициента k_g

Грунт	$H_{гр}$	k_g
Скальный ненарушенный	-	1
Скальный нарушенный толщиной 1 - 2 м	-	1,6
Песчано-глинистые отложения толщиной более 30 м	10	1
	7,5	1,2-1,5
Песчано-глинистые отложения толщиной до 30 м	£ 5	2
	10	1,2-1,5
	7,5	2,0
Насыпной слой толщиной до 5 м	£ 5	2,5-3,0
	-	3,5
	Сильно обводненный	5,0

Суммарный ранг объекта определяется согласно СНиП и выражается суммой четырех частных рангов $P = P_C + P_M + P_T + P_Y$. Значения ранга P_C , характеризующего состояние объекта, приведены в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Значения ранга P_C

Характеристика состояния сооружения	P_C
Качество строительных работ хорошее. Отсутствуют какие-либо нарушения и остаточные деформации	0
В стенах или заполнителе имеются небольшие трещины	1
Имеются значительные трещины в стенах, заполнителе или каркасе	2
Имеются трещины в стенах и в каркасе	3

Значения ранга P_M , характеризующего тип материала стен или заполнителя, приведены в табл. 8.3.

Таблица 8.3

Значения ранга P_M

Материал стен или заполнителя	P_M
Дерево	0
Камень, кирпич, легкие панели	1
Крупные панели	2
Крупные блоки, монолитный железобетон	3

Ранг, характеризующий тип зданий, имеет два значения: для зданий каркасного типа $P_T = 0$, для зданий с несущими стенами $P_T = 1$.

Величина P_Y - ранг, зависящий от наличия антисейсмических усилений. Для зданий, не имеющих антисейсмических усилений, $P_Y = 1$.

Для зданий с антисейсмическими усилениями, рассчитанными на колебания от семибалльного землетрясения, $P_Y = 0$. При антисейсмических усилениях, рассчитанных на более высокую бальность, для каждого последующего балла вычитается единица.

В табл. 8.4 приведены значения (в мм/с) величины предельно допустимой скорости колебаний сооружений различных классов и суммарных рангов.

При практических расчетах по определению безопасных расстояний или максимального заряда ВВ неравенство (8.1) сводится к трансцендентному уравнению относительно \bar{R} :

$$\bar{R} = f(X), \tag{8.3}$$

где: $X = u_{пр}/(k_u k_m k_q k_h k_g)$.

Таблица 8.4

Величина предельно допустимой скорости колебаний сооружений

Суммарный ранг, P

k	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	122	73,9	44,8	27,2	16,5	10,0	6,1	3,7	2,2	1,4	0,1
2	201	122	73,9	44,8	27,2	16,5	10,0	6,1	3,7	2,2	1,4
3	331	201	122	73,9	44,8	27,2	16,5	10,0	6,1	3,7	2,2
4	546	331	201	122	73,9	44,8	27,2	16,5	10,0	6,1	3,7

Безопасность зданий и сооружений обеспечивается, если $\bar{R} \geq \bar{R}$, где \bar{R} определяется из уравнения 8.3. Корни уравнения 8.3 в зависимости от величины X приведены в табл. 8.5.

При превышении допустимой для данного сооружения скорости необходимо руководствоваться данными рис. 8.1, по оси ординат которого отложены значения вероятности сохранения зданий и сооружений W , а по оси абсцисс - величина $C = u/u_{пр}$.

Таблица 8.5

Корни уравнения

x	\bar{R}	X	\bar{R}	X	\bar{R}	X	\bar{R}	X	\bar{R}
1,70	0,788	0,2	2,13	1,50 ⁻²	8,27	9,0 ⁻⁴	46,8	1,0 ⁻⁴	240
1,5	0,834	0,1	3,01	1,25 ⁻²	9,16	8,0 ⁻⁴	50,7	9,0 ⁻⁵	262
1,25	0,904	0,09	3,17	1,0 ⁻²	10,4	7,0 ⁻⁴	55,6	8,0 ⁻⁵	289
1,0	1,0	0,08	3,38	8,0 ⁻³	11,9	6,0 ⁻⁴	61,9	6,0 ⁻⁵	369
0,9	1,05	0,07	3,61	6,0 ⁻³	14,0	5,0 ⁻⁴	70,4	4,0 ⁻⁵	528
0,8	1,11	0,06	3,91	4,0 ⁻³	17,9	4,0 ⁻⁴	82,7	2,0 ⁻⁵	1012
0,7	1,18	0,05	4,30	3,0 ⁻³	21,4	3,0 ⁻⁴	102	1,0 ⁻⁵	2056
0,6	1,26	0,04	4,83	2,0 ⁻³	27,7	2,5 ⁻⁴	117	7,5 ⁻⁶	2816
0,5	1,38	0,03	5,64	1,5 ⁻³	33,3	2,0 ⁻⁴	139	5,0 ⁻⁶	4493
0,4	1,53	0,02	7,04	1,25 ⁻³	37,6	1,5 ⁻⁴	173	2,5 ⁻⁶	1078
0,3	1,75	0,018	7,58	1,0 ⁻³	43,6	1,25 ⁻⁴	200	1,0 ⁻⁶	4193

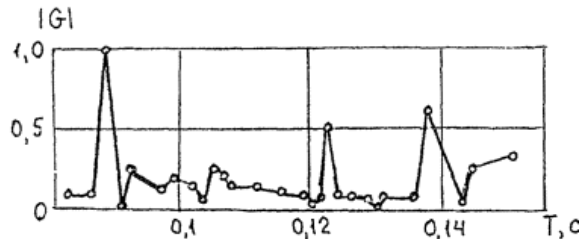


Рис. 7.5. Экспериментальный спектр смещений

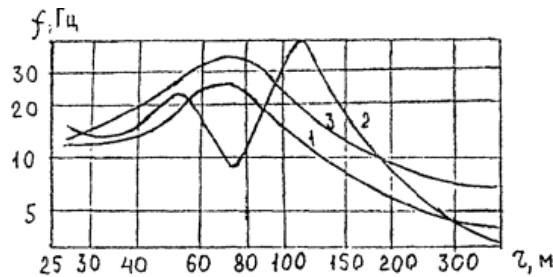


Рис. 7.6. Зависимость основных частот от расстояния

Пример расчета. Определить минимальное безопасное расстояние от ОИАЭ до наземного склада ВВ (одновременно может взорваться 100 т ВВ), если на объекте имеются два здания каркасного типа и одно с несущими стенами из кирпича, антисейсмическое усиление у зданий отсутствует: одно каркасное здание с крупными панелями, второе - с легкими. Все здания имеют небольшие трещины и являются сооружениями, важными для безопасности; следовательно, относятся к первому классу. Грунты в основании зданий - необводненные суглинки, $C_p = 800$ м/с, $n = 0,35$, $r = 1,4$ т/м³. Суммарные ранги P для первого, второго и третьего зданий равны соответственно 4, 3, 4. По табл. 8.4 предельно допустимая массовая скорость в грунте для данного объекта равна 6,1 мм/с.

$$k_u = \left[\frac{1 + 0,35}{3(1 - 0,35)} \right]^{2/3} (800/1,4)^{1/3} \approx 6,5; \quad k_k \approx 0,25,$$

$$k_m = k_g = k_g = 1.$$

Используя интерполяцию, по табл. 8.5 находим $R = 18,6$. Следовательно, минимальное расстояние от объекта до склада ВВ

$$r = \bar{R}^3 \sqrt{\alpha M_{ВВ}} = 18,6 \times 53,1 = 988 \text{ м}$$

где коэффициент α согласно приложения 3 равен 1,5. Для сравнения приведем вычисленное по формуле (3.4) приложения 3 давление во фронте ВУВ $DP_{\phi} = 6,06$ кПа, соответствующее $\bar{R} = 18,6$.

II. Определение кинематических параметров сейсмозрывных волн

В случае сферического источника продольных монохроматических волн выражение для комплексной частотной характеристики $M_p(\omega)$ удается выписать в явном виде [10]. Так, для идеально упругой среды имеем

$$M_p(\omega) = \left[\frac{1}{r} + \frac{i\omega}{C_p} \right] \left[\omega_{op}^2 - \omega + 2i\beta_p \right]^{-1} \quad (8.4)$$

Соответственно вектор смещения w_p в этом случае:

$$w_p = (R_0 d_0) / r M_p(\omega) r / r \exp(i\omega\tau) \quad (8.5)$$

В формулах (8.4-8.5) приняты следующие обозначения:

$\omega_{op} = 2 C_s/R_0$ - частота собственных колебаний; $b_p = \omega_{op} b_s/C_p$ - коэффициент затухания; $t = t - (r - R_0)/C_p$; C_s - скорость распространения поперечных волн в грунте; R_0 - радиус полости; d_0 - амплитуда давления.

В общем случае импульсной функции d , имеющей комплексный спектр $D(\omega)$, экспоненту в формуле 8.5 необходимо заменить на $D(\omega)$.

Для упругой среды с поглощением $a = b \text{ abs}(w)$ комплексный спектр:

$$G(\omega) = (R_0 d_0) / r i \omega M_p(\omega) N_p(\omega),$$

где комплексная характеристика поглощающей среды:

$$N_p(\omega) = \exp\left\{-\left[\alpha_p(\omega)(r - R_0) - i\omega(r - R_0)\right] \left[1/V_{p0} - 1/V_p(\omega)\right]\right\}. \quad (8.6)$$

Для практических приложений полагают:

$$N_p(\omega) \approx \exp\left\{-\left[\varepsilon \operatorname{abs}(\omega / \omega_0) + i\omega(r - R_0) / V_{p0}\right]\right\}. \quad (8.7)$$

В формулах 8.6 и 8.7 $e = Q_{p0}(r - R_0) / L_{p0}$ - обобщенное расстояние, $L_{p0} = 2\rho V_{p0} / \omega_0$, ω_0 - произвольное значение частоты, V_{p0} - скорость продольной волны в непоглощающей (идеально упругой) среде; Q_{p0} - декремент поглощения (см. [10], где приведены таблицы для определения Q_{p0}); $Q_p = a_p L_p$; $V_p(\omega)$ - фазовая скорость, характеризует для среды с поглощением аномальную дисперсию скорости.

На частотно-избирательный характер зависимости спектра от поглощения заметно влияет V_p - очень медленно возрастающая с ростом e функция. На рис. 8.2 приведены графики зависимости $N_p(\omega)$ от ω , на рис. 8.3 и рис. 8.4 зависимость функции $\operatorname{abs}(G(\omega))$ от ω ; цифры у кривых соответствуют различным e . Графики рис. 8.3 соответствуют $n \gg 0,4$, для рис. 8.4 $n \gg 0,02$.

В целом можно сделать вывод: по мере увеличения обобщенного расстояния e , что при неизменных свойствах среды и источника соответствует удалению от источника, спектры заметно изменяются. Максимумы спектров монотонно переходят в область низких частот. Для зарядов, расположенных на поверхности (накладных), аналитические выражения для спектров, подобные (8.3-8.6), получить не удается и приходится обращаться к экспериментальным данным. Из приведенного на рис. 8.5 экспериментального графика спектра смещения грунта для накладного заряда следует, что общий цуг сейсмических колебаний содержит несколько максимумов. По результатам вычисления дискретных спектров энерговыделения установлено [7], что на трех основных частотах выделяется 82-98 % сейсмической энергии. На рис. 8.6 приведены графики изменения основных частот в зависимости от расстояния до места взрыва [7], причем частотам f_1 , f_2 , f_3 соответствуют приблизительно 50, 25 и 15 % всей энергии.

Несмотря на различия в абсолютных величинах частот и плотностей потока энергии при взрывах различных зарядов, расположенных в грунтах с различными характеристиками, можно сформулировать общие четко проявляющиеся закономерности.

1. Энергия сейсмозврывных волн на различных частотах спектра не одинакова, а в энергетическом спектре колебаний имеется четко выраженный максимум, т.е. на определенной частоте выделяется больше энергии, чем на других частотах.

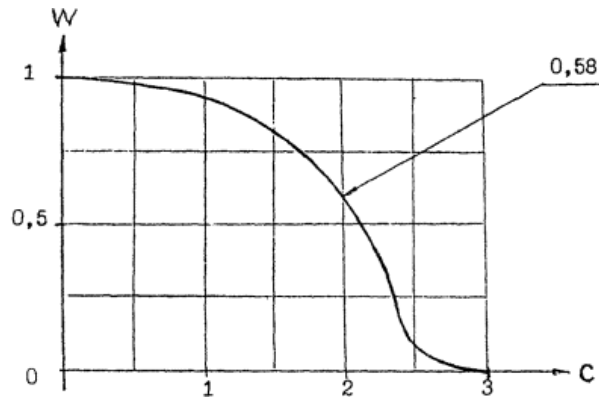


Рис. 8.1. Вероятность сохранения зданий и сооружений

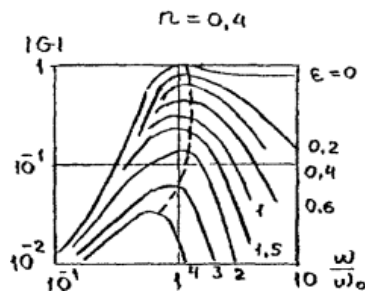


Рис. 8.2. Зависимость $N_p(\omega)$

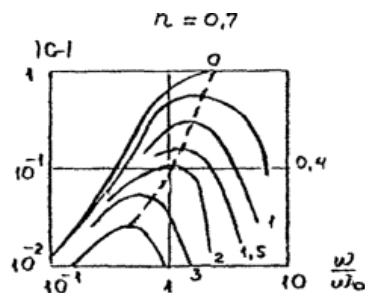


Рис. 8.3. Функция $G(\omega)$; $u = 0,4$

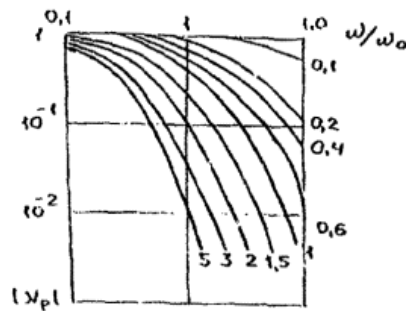


Рис. 8.4. Функция $G(w); u = 0,02$

2. Частота f_1 , на которой наблюдается максимум энергии, с расстоянием изменяется. При этом с удалением от границ сейсмического очага взрыва прослеживается монотонное уменьшение частоты f_1 .

III. Безотказность оборудования

Безотказность различного оборудования при воздействии сейсмозрывных волн (в том числе электротехнического), находящегося в зданиях и сооружениях, заведомо не обеспечивается при выполнении соотношения $r \leq r_{оч}$, где: r и $r_{оч}$ - минимальное расстояние от здания до источника взрыва и радиус сейсмического очага.

Радиус сейсмического очага:

$$r_{оч} = 60(C_p)^{-4/3} [(\alpha M_{BB}) / \rho]^{1/3} (1-\nu)^{-5/6} (1+\nu)^{-1/6}$$

Если физико-механические характеристики грунта не известны, то радиус сейсмического очага:

$$r_o = K_0 \sqrt[3]{\alpha M_{BB}}$$

где K_0 равен 5,0-5,6; 10; 11 м/кг^{1/3} соответственно для большинства скальных ненарушенных пород, для глин, песков и суглинков.

Список использованной литературы

1. Адушкин В.В., Спивак А.А. Геомеханика крупномасштабных взрывов. М., Недра, 1993.
2. Баум Ф.А., Станюкович К.П., Шехтер В.И. Физика взрыва. М., Физматгиз, 1959.
3. Безопасность взрывных работ в промышленности. Под общей редакцией Кутузова Б.Н. М., Недра, 1992.
4. Бейкер У., Кокс П. и др. Взрывные явления. Оценка и последствия. В двух книгах. М., Мир, 1986.
5. Бирбрайер А.Н., Шульман С.Г. Прочность и надежность конструкций АЭС при особых динамических воздействиях. М., Энергоатомиздат, 1989.
6. Богацкий В.Ф. Прогноз и ограничение сейсмической опасности промышленных взрывов. Сб. Взрывное дело № 85/42. М., Недра, 1983.
7. Богацкий В.Ф., Пергамент В.Х. Сейсмическая безопасность при взрывных работах. М., Недра, 1978.
8. Богацкий В.Ф., Фридман А.Г. Охрана инженерных сооружений и окружающей среды от вредного действия промышленных взрывов. М., Недра, 1983.
9. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Физматгиз, 1962.
10. Гурвич И.И., Боганек В.Д. Сейсмическая разведка. М., Недра, 1980.
11. Инструкция по расчету фортификационных сооружений на действие обычных средств поражения. ВСН 55-79 МО СССР. М., 1980.
12. Коротков П.Ф. Об увеличении давления в ударной волне взрыва в направлении ветра. ПМТФ, 1961, № 3, с. 25-35.
13. Коротков П.Ф. Об ударных волнах на значительном расстоянии от места взрыва. Изв. АН СССР, серия ОТН, 1958, № 3, с. 165-167.
14. Миронов П.С. Взрывы и сейсмотехника сооружений. М., Недра, 1973.
15. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (ОПБ-88), ПНАЭ Г-1-011-89. Госатомэнергонадзор СССР. М., Энергоиздат, 1990.
16. Охоцимский Д.Е. и др. Расчет точечного взрыва с учетом противодавления. Труды Математического института АН СССР. 1957, т. 1.
17. Положение по организации и проведению экспертизы проектных и других материалов и документации, обосновывающих безопасность ядерно- и радиационно опасных объектов (изделий) и производств (технологий). Утверждено приказом № 41 Госатомнадзора России от 07 апреля 1994 г. РД-08-18-94.
18. Пин АЭ-5.6. Нормы строительного проектирования АС с реакторами различного типа. Госатомэнергонадзор СССР. М., Энергоиздат, 1990.
19. Руководство по проектированию строительных конструкций убежищ гражданской обороны. ЦНИПромзданий Госстроя СССР, М., Стройиздат, 1982.
20. Справочник взрывника. Под ред. Кутузова Б.Н. М., Недра, 1988.
21. Справочник проектировщика. Динамический расчет сооружений на специальные воздействия. М., Стройиздат. 1981.
22. Справочник. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. М., Химия, 1990.

23. Таблицы физических единиц. Справочник под ред. Кикоина И.К. М., Атомиздат, 1976.
24. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на ядерно- и радиационно опасные объекты. ПНАЭ Г-05-035-94/Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности. М., Госатомнадзор России. 1994.
25. Учет чрезвычайных ситуаций, возникающих в результате деятельности человека, при выборе площадок для атомных электростанций. Вена, МАГАТЭ, 1983. Серия 50-CG-S5.
26. Цейтлин Я.И., Ганопольский М.И., Громов В.А. Влияние метеоусловий на интенсивность слабых ударно-воздушных волн взрывов, ФТПРПИ, 1980, № 3, с. 51-55.
27. Цейтлин Я.И., Смолий Н.И. Сейсмические и ударно-воздушные волны промышленных взрывов, Недра, 1981.
28. Greenland B.J., Knowies J.D. Enviromental consideration of quarry blasting. The Quarry Managers Journal, 1970, v. 54, № 10.
29. Gustafsson R. Swedish blasting technique. Geteborg , 1973. (Имеется русский перевод: Густафссон Р. Шведская техника взрывных работ. М., Недра, 1978).
30. Langefors U., Kihlstrom В. Modern technique of rock blasting. N.-Y.-L., 1960. (Имеется русский перевод: Лангефорс У., Кильстрем В. Современная техника взрывной отбойки горных пород. М., Недра, 1968).