

КАРАГАНДИНСКИЙ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
КАЗПОТРЕБСОЮЗА

Какенов Кайрат Саттуович

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ
ВЗРЫВНЫМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ. АНАЛИЗ ПОСЛЕДСТВИЙ
АВАРИЙНЫХ ВЗРЫВОВ

Караганда – 2012

УДК 622.81
ББК33.15
К16

Рекомендовано к изданию Ученым Советом Карагандинского экономического университета 29.05.2012 года.

Рецензенты: **д.т.н., профессор Плотников В.М.,**
д.т.н., профессор Исагулов А.З.

Какенов К.С. Современные методы уплотнения грунтов взрывными воздействиями. Анализ последствий аварийных взрывов: Монография- Караганда: КЭУ, 2012. – 361 с.

ISBN 978-601-233-344-2

Монография посвящена проблеме уплотнения грунтов газовзрывным воздействием и исследованию последствий аварийных взрывов.

В монографии проанализированы закономерности уплотнения грунтов при импульсном нагружении, приведены результаты экспериментальных исследований и рекомендации по практическому использованию газовзрывного метода уплотнения грунтов. Рассмотрены актуальные вопросы обеспечения взрывобезопасности: определение параметров нагрузки при детонации и дефлаграции, нормирование степени риска поражения людей и объектов, условия поражения людей ударной волной и тепловым излучением, критерии поражения людей и повреждения объектов. Приведены многочисленные примеры расчетов и методики оценки риска аварийности.

Книга представляет интерес для студентов технических специальностей, сотрудников проектных и научно-исследовательских организаций, работников потенциально взрывоопасных производств. Данная работа может служить в качестве пособия для экспертов, расследующих причины возникновения аварийных взрывов.

УДК 622.81
ББК 33.15

ISBN 978-601-233-344-2

© Карагандинский экономический университет, 2012
© Какенов К.С., 2012

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ГЛУБИННЫХ МЕТОДОВ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ	12
1.1 Анализ практики уплотнения грунтов глубинными взрывами	14
1.2 Анализ практики уплотнения грунтов подводными взрывами	28
1.3 Анализ практики уплотнения взрывами просадочных грунтов	43
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ ПРИ ВЗРЫВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ	57
2.1 Особенности действия взрывных нагрузок в грунтах.....	57
2.2 Особенности структуры несвязных и связных грунтов...	64
2.3 Упруговязкопластические деформации грунтов при статических и динамических нагрузках	72
2.4 Амплитудно-частотный спектр волн напряжений в грунте, генерируемых взрывным нагружением	81
2.5 Определение зоны разрушения структуры и уплотнения грунта при взрывных воздействиях.....	92
ГЛАВА 3. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО УПЛОТНЕНИЮ ГРУНТА ГАЗОВЗРЫВНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ.....	101
3.1 Экспериментальная установка и измерительная аппаратура	101
3.2 Подготовка образцов грунта в лабораторных условиях...	104
3.3 Результаты экспериментальных исследований и их анализ	107
3.3.1 Выбор основных параметров газоимпульсного уплотнения	107
3.3.2 Уплотнение песчаного грунта газовзрывным воздействием	114
3.3.3 Уплотнение суглинка нарушенной структуры при газовзрывном воздействии	119
3.3.4 Закономерности уплотнения грунтов газовзрывным	

воздействием	125
ГЛАВА 4. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ ГАЗОВЗРЫВНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ.....	129
4.1 Экспериментальная установка и измерительная аппаратура	129
4.2 Методика определения физико-механических свойств грунта в полевых условиях	131
4.3 Статистическая обработка результатов пенетрационных испытаний грунтов	137
4.4 Методика прогнозирования уплотнения грунтов при газовзрывном воздействии	147
4.5 Определение зон деформаций грунта при газовзрывном воздействии	147
4.6 Инженерно-геологические условия площадки для проведения полевых испытаний.....	150
4.7 Формирование полей напряжений и зоны уплотнения при газовзрывном воздействии	154
ГЛАВА 5. ПОВЫШЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ БУРОНАБИВНЫХ СВАЙ ЗА СЧЕТ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТА ГАЗОВЗРЫВНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ	169
5.1 Рекомендации по практическому использованию газовзрывного метода уплотнения грунтов.....	169
5.2 Аварийные нагрузки, возникающие при устройстве буронабивных свай уплотнением грунтов газовзрывным воздействием	173
5.3 Расчет несущей способности буронабивных свай при уплотнении грунта газовзрывным воздействием.....	180
5.4 Техничко-экономическое обоснование применения буронабивных свай при уплотнении грунта газовзрывным воздействием.....	183
ГЛАВА 6. АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ГАЗОВЗРЫВНОГО МЕТОДА УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ.....	188
6.1 Оценка риска аварий	189
6.2 Анализ статистических данных по взрывам горючих газов	195
6.3 Оценка риска аварийных взрывов от разгерметизации баллонов со сжиженным газом	208

ГЛАВА 7. ЗАКОНОМЕРНОСТИ АВАРИЙНЫХ ВЗРЫВОВ ГАЗОПАРОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ	220
7.1 Особенности взрывов газопаровоздушных смесей в открытом пространстве	220
7.2 Определение параметров взрыва при дефлаграционном горении газопаровоздушных смесей	234
7.3 Особенности поражающего действия воздушной ударной волны на различные объекты	241
ГЛАВА 8. ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙ НА ВЗРЫВООПАСНЫХ ОБЪЕКТАХ.....	256
8.1 Методика оценки опасностей и аварийности технологических процессов	256
8.2 Методика оценка последствий аварий	269
8.3 Оценка экономического ущерба от аварии	272
ГЛАВА 9. ХАРАКТЕРИСТИКА ПОРАЖАЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОВОЙ РАДИАЦИИ ОТ ВЗРЫВА	279
9.1 Общие сведения	279
9.2 Закономерности нестационарного развития огненного шара при взрыве	281
9.3 Особенности теплового излучения огненного шара при взрыве	286
9.4 Критерии поражения тепловым излучением при взрыве.	297
ГЛАВА 10. ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ПОРАЖЕНИЯ ЛЮДЕЙ И ПОВРЕЖДЕНИЯ СООРУЖЕНИЙ ПРИ АВАРИЙНОМ ВЗРЫВЕ	307
10.1 Общие сведения	307
10.2 Прямое и побочное действие ударной волны на человека	310
10.3 Поражения органов дыхания воздушной взрывной волной	315
10.4 Поражение воздушной взрывной волной органов слуха, головы и тела при ударе	321
10.5 Аппроксимация законов поражения людей и повреждений объектов в зоне действия взрыва	332
ЛИТЕРАТУРА	346

ВВЕДЕНИЕ

В практике современного строительства для улучшения качества работы и свойств грунтов оснований часто применяют уплотнение грунтов. Уплотнение грунтов заключается в повышении плотности грунтов вследствие уменьшения объема пустот в них (уменьшения пористости). Уплотнение увеличивает объемный вес грунта, повышает сопротивление его сжатию и вдавливанию (повышает несущую способность), уменьшает возможность фильтрации воды через грунт, способность к влагопоглощению, осадке и т. д.

Уплотнение грунтов обычно протекает как процесс вытекания из грунтов газообразной фазы (воздуха), вследствие чего происходит сближение твердых частиц и грунт, состоящий из трех фаз — твердой, жидкой (воды) и газообразной, переходит в состояние, близкое к двухфазной системе — грунтовой массе. Максимально уплотненные грунты содержат не более 5% воздуха. Наибольшее уплотнение достигается при оптимальной влажности грунта.

Уплотнение грунтов позволяет существенно увеличить несущую способность основания грунтовых сооружений, уменьшить фильтрацию как в пределах всего сооружения, так и через отдельные его элементы, обеспечить устойчивость структуры грунтов при воздействии динамических нагрузок и тем самым повысить надежность и экономичность оснований и сооружений.

В настоящее время известны различные методы уплотнения грунтов: поверхностное; глубинное динамическими воздействиями; устройство

грунтовых свай; статической нагрузкой; с помощью искусственного водопонижения. Механическое уплотнение грунтов является эффективным приемом улучшения физико-механических свойств оснований в грунтовых сооружениях.

Одной из универсальных, принципиально новых технологий является взрыв. С его помощью перемещают грунт, дробят прочные породы, штампуют детали, режут, прессуют и сваривают металлы. Ударной волной можно поднять давление в замкнутых объемах до миллионов атмосфер, а температуру - до десятков тысяч градусов. Взрывная технология - это целенаправленное разрушение, перемещение, изменение структуры и формы естественных (горные породы, лёд, древесина) и искусственных (металлы, пластмассы, бетон и т.п.) материалов, которое осуществляется за счёт энергии взрыва. Основные особенности взрывной технологии - соединение в заряде взрывчатого вещества функций энергоносителя и рабочего органа, быстрота протекания процесса, высокие мощности. Взрывная технология характеризуется повышенной опасностью (возникновение воздушной ударной волны, сейсмического воздействия, разлёт разрушаемой среды, образование вредных газообразных продуктов детонации), что требует соблюдения специальных правил безопасности.

Широко используется взрывной импульс и в строительстве. Основными областями взрывных технологий в строительстве является устройство профильных выемок (каналов, котлованов) взрывом на выброс, рыхление талых и мерзлых грунтов, дноуплотнительные работы, техническая мелиорация грунтов, уплотнение просадочных грунтов. При этом

возможности направленного формирования инженерных свойств грунта с помощью взрывных методов непрерывно расширяются.

Эффективным средством увеличения прочности оснований сооружений является взрывное уплотнение просадочных и водонасыщенных несвязанных грунтов. Разжижение грунта происходит из-за исчезновения значительной части контактов между частицами скелета после прохождения волны сжатия. Через определенное время (часы, дни) после разжижения взрывом начинается консолидация твёрдых частиц и уплотнение грунта. Из формирующегося при этом осадка вытесняется вода, и он приобретает устойчивую структуру. Используя эти свойства грунтов, строят земляные сооружения в заболоченных районах.

Увеличение строительства в труднодоступных районах сопровождается вовлечением в сферу инженерной деятельности грунтов с неблагоприятными структурно-механическими характеристиками и сложными условиями залегания, где взрывные технологии, обеспечивающие простоту и высокую скорость выполнения земляных работ занимают особое место. При уплотнении взрывом просадочных грунтов (супеси, суглинки, галечник и т.п.) применяют методы глубинных, поверхностных и подводных взрывов.

По сравнению с другими динамическими способами уплотнения грунтов основной особенностью метода взрывов является использование весьма мощного, доступного и сравнительно дешевого источника динамических воздействий.

Стоимость и сроки уплотнения грунтов взрывами значительно меньше, чем при других методах уплотнения грунтов. Ориентировочно стоимость уплотнения 1 м^3 песчаного грунта глубинными взрывами принимается в пределах 0,03 - 0,1 доллара. При подводных взрывах вследствие увеличения расхода взрывчатых веществ (ВВ) себестоимость 1 м^3 грунта достигает 0,1 - 0,3 доллара. По данным П.Прага, себестоимость уплотнения песчаных грунтов глубинными взрывами в США составляет 0,25 - 0,8 доллара за 1 м^3 , а с учетом местных условий - $\pm 25\%$.

С методами взрывного уплотнения грунтов сопоставимы различные глубинные методы уплотнения: глубинными вибраторами (виброфлотация), виброштыкованием, устройством грунтонабивных свай и тяжелыми трамбовками. Однако все эти методы трудоемки, требуют изготовления специального оборудования и вследствие относительно малых радиусов действия малопроизводительны.

Работы в области разработки метода уплотнения слабосвязных грунтов оснований взрывами были начаты в Санкт-Петербургском политехническом университете в 1949 году.

Первые опытные работы в натуральных условиях на водонасыщенных песках были выполнены П.Л.Ивановым под руководством В.А.Флорина на строительстве Волжской ГЭС, а в дальнейшем – под руководством П.Л.Иванова его учениками и сотрудниками (Крутов А.П., Трунков Г.Т., Горелик Л.Ш. и др.) на многочисленных объектах гидротехнического строительства.

Родоначальником взрывного метода уплотнения

просадочных лёссовых грунтов оснований является И.М.Литвинов в Украине. Впоследствии этот метод получил развитие в исследованиях Аскарова Х.А., Ядгарова З.Х., Тахирова И.Г., Рузиева А.Р., Усманова Р.А., Мусаэляна А.А., Вильфенда А.Г. по уплотнению просадочных грунтов в Таджикистане и Узбекистане.

В странах дальнего зарубежья широкое использование взрывного метода уплотнения оснований начинается только с 1960г. фирмами США на различных объектах как в самой стране, так и за ее пределами.

В 70-е годы взрывной метод уплотнения, получает дальнейшее развитие в Польше в исследованиях, проводимых под руководством проф. Dembicki E.

С осени 1986 года под научно-методическим руководством П.Л.Иванова начинается внедрение метода взрывного уплотнения песчаных грунтов оснований на строительстве комплекса сооружений г.Санкт-Петербурга (Ленинграда) для защиты от наводнений. Уплотнению подвергался широкий спектр слабосвязных грунтов оснований: от пылеватых супесей до среднезернистых песков, галечника и каменной наброски.

Исследования показали, что применение метода уплотнения грунтов взрывными воздействиями является весьма эффективным средством увеличения прочности оснований сооружений, а также уменьшения их деформируемости при действии статических и, в особенности, динамических нагрузок.

Таким образом, отечественные и зарубежные ученые заложили теоретические основы

динамических методов уплотнения грунтов и экспериментально доказали их эффективность.

Вместе с тем, современная практика строительства требует дальнейших теоретических и экспериментальных исследований характера распределения полей напряжений при взрыве, механизма взаимодействия отдельных фронтов взрывных волн в массиве, процесса образования под действием динамических нагрузок полей деформации и зон уплотнения. В связи с этим нами были проведены исследования по определению параметров уплотнения связных грунтов газовзрывным воздействием и разработке авторского метода уплотнения грунтов, основные результаты которого освещены в пред-лагаемой монографии. Отдельные главы работы посвящены вопросам обеспечения взрывобезопасности, оценке риска и анализу последствий аварийных взрывов.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ГЛУБИННЫХ МЕТОДОВ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Особенность расчета заглубленных в грунт сооружений заключается в необходимости учета кроме активных сил от внешних воздействий реактивных сил грунта. Для определения этих сил необходимо знать механические показатели, характеризующие способность грунта сопротивляться действующим нагрузкам. Процессы деформации грунтов под нагрузкой чрезвычайно сложны и многообразны [1]. Подробный анализ деформации грунтов дан работе [2], в которой все деформации в грунтах делятся на остаточные и восстанавливающиеся. К восстанавливающимся относятся упругие и структурно-адсорбционные, а также деформации, связанные с упругим сжатием и расширением защемленного воздуха, к остаточным - структурные и псевдопластические деформации.

Точный учет природных механических свойств грунтов весьма затруднен. Обычно при расчетах приходится вводить некоторую схематизацию механических свойств грунтов путем замены природного грунта некоторой расчетной моделью, свойства которой известны. При выборе расчетной модели надо стремиться к тому, чтобы модель описывала механические свойства грунтов минимальным числом параметров, так как для столь неоднородной среды, как грунты, каждый параметр определяется приближенно как среднеинтегральная величина. Поэтому чем меньше параметров будет содержать принятая расчетная модель, меньше приближенных величин будет вводиться в расчет.

Наибольшее распространение в практике проектирования заглубленных в грунт сооружений получили две расчетные модели. Согласно первой, грунт рассматривается как упругая среда, согласно второй - как упругое линейно деформируемое полупространство. Согласно второй модели грунт деформируется и за пределами нагруженной части. При этом деформации распространяются в стороны до бесконечности, постепенно затухая по мере удаления от нагруженной части. Механические свойства грунта характеризуются двумя параметрами: модулем упругости E и коэффициентом Пуассона μ .

Большой вклад в разработку динамики грунтов внесли Х.А. Рахматулин, С.С. Давыдов, Д.Я. Сагомоян, Б.А. Олисов, С.С. Григорян, Г.М. Ляхов, И.В. Зволинский, Г.И. Покровский и др. Механические свойства грунтов при динамических нагрузках в значительной степени зависят от количественного соотношения твердых и газообразных компонентов, слагающих грунт, особенностей напряженно-деформируемого состояния грунтов и характеризуются весьма различными и противоположными моделями в виде модели сплошного твердого тела и модели идеальной жидкости и газа. Модель сплошного твердого тела применяют для неводонасыщенных грунтов, модель идеальной жидкости - для водонасыщенных [3-7].

В настоящее время при проектировании возникает ряд сложных проблем, связанных с необходимостью расчета сооружения на динамические воздействия нагрузок от взрывных работ, а также на сейсмическое воздействие и другие ударные эффекты. Взрывные работы широко

применяются в строительстве. Одним из сравнительно новых и развивающихся направлений использования взрывов в строительстве является применение их для уплотнения грунтов. В зависимости от расположения заряда взрывчатого вещества (ВВ) относительно уплотняемого объема грунта могут быть выделены глубинные, поверхностные и подводные способы уплотнения взрывом.

1.1 Анализ практики уплотнения грунтов глубинными взрывами

При уплотнении грунтов глубинными взрывами заряды погружают в грунт на глубину, исключая выброс и существенный выпор грунта при взрыве. Впервые опытное уплотнение влажных песчаных грунтов глубинными взрывами выполнено Н.Н. Масловым и Н.А. Филимоновым [8]. Уплотнение песчаной насыпи высотой 8м проводилось при строительстве Верхне-Свирской ГЭС. Влажные пески залегали выше горизонта грунтовых вод.

В результате трех последовательных взрывов зарядов массой по 15кг средняя осадка после первого составила 8см, после второго – 10см и после третьего – 8см. Максимальная осадка достигла 44см.

Так как песчаные грунты не были полностью насыщены водой, вследствие осадки насыпи образовалось большое число трещин, некоторые из которых достигали глубины 4м и раскрывались до 4см. Это, по-видимому, уменьшило интерес к полученному эффекту уплотнения песков и дальнейших исследований не проводилось.

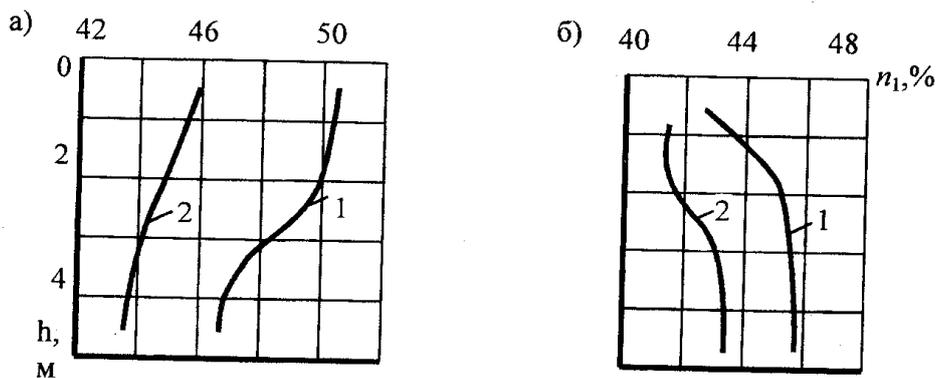
Уплотнение песчаного естественного основания плотины Франклин (США) производилось в 1941г.[9].

Земляная плотина на р.Пемигеауссет недалеко от г. Франклин была спроектирована для регулирования паводка. Пойменные части плотины расположены на двух террасах, сложенных рыхлыми аллювиальными пылеватыми мелкозернистыми и среднезенистыми песками, залегающими на глубине 4,5-9м. Пористость этих песков достигала 50%. Ниже располагались слои достаточно плотных крупнозернистых песков и гравия.

Согласно данным А. Лаймана [9], перед началом уплотнения на одном из участков пойменной террасы были проведены опытные взрывы 21 заряда из 60% динамита массой 3,5кг каждый, установленных на глубине 4,5м и на расстоянии 3м один от другого. В результате взрывов средняя осадка поверхности площадки достигала 37см.

Для дальнейшей отработки способа участок был уплотнен пятью сериями взрывов таких же зарядов. В каждой серии взрывов заряды располагали на расстоянии 6м один от другого, заряды каждой последующей серии располагали в шахматном порядке относительно зарядов предыдущей серии. Осадка поверхности достигала 60см.

До и после взрывов были вырыты два шурфа, в которых до глубины 4,5м отбирали образцы ненарушенной структуры (рисунок 1). В результате взрывов средняя пористость снизилась с 49 до 44,3%, а степень плотности сложения - с 0,27 до 0,65. Расход воды из скважин, расположенных около шурфов, до взрывов достигал 1,5 м³/мин, а после снизился до 0,28 м³/мин.



а) - основание плотины Франклин;
 б) - основание плотины Денисон;
 1 - до взрывов; 2 - после взрывов

Рисунок 1. Изменение плотности песчаного грунта при его уплотнении взрывами

Два производственных участка основания размерами в плане 120х250м каждый были уплотнены взрывами 12000 зарядов. На западной террасе осадка поверхности достигла 60см при глубине слоя рыхлых песков около 6м. Пористость песка уменьшилась до 44% и степень плотности сложения достигла 0,5. Восточная терраса с толщиной рыхлых песков 7,5м в результате взрывов дала осадку 75см. В образцах, отобранных после взрывов, пористость составила 42% и степень плотности - 0,6.

Первые глубинные взрывы в практически полностью водонасыщенных песках выполнены под руководством В.А. Флорина на строительстве Волжской ГЭС им. В.И. Ленина в 1951г. [10-13]. Уплотнение опытного участка глубинными взрывами производилось на о.Телячий в створе строящейся плотины. Участок сложен пойменными песчаными отложениями, представленными

мелкозернистыми песками. Пористость песков 41-42% и степень плотности сложения 0,4-0,5. Горизонт грунтовых вод находился на глубине 3м.

Так как работы проводились инженерно-геологической экспедицией Гидропроекта, то для установки зарядов бурились скажины вначале «ложкой», а затем, ниже горизонта грунтовых вод, желонкой на глубину 9-10м. Скважины обсаживались трубами диаметром 150мм. Затем в скважины опускали заряды и обсадные трубы выдергивали. Ниже горизонта воды скважина заплывала песком, а выше ее приходилось засыпать.

Скважины бурили по сетке 10x10м. Для зарядок первой серии было пробурено девять скважин. В каждой скважине устанавливалось два заряда – один на глубине 5-5,5м и второй на глубине 8м. Заряды первой серии взрывали одновременно. Заряды второй серии устанавливали в четырех скважинах, пробуренных в центре каждого из четырех квадратов первой очереди, и взрывали одновременно.

В результате двух серий взрывов получена достаточно равномерная осадка всей площади между зарядами (рисунок 2). Общая средняя осадка между скважинами составила 18см, а после первой серии взрывов - 10см. Радиус распространения осадки в сторону от уплотняемой площади не превышал 10см. Все скважины были пробурены заранее, и поэтому обсадные трубы скважин второй серии было очень трудно извлечь.

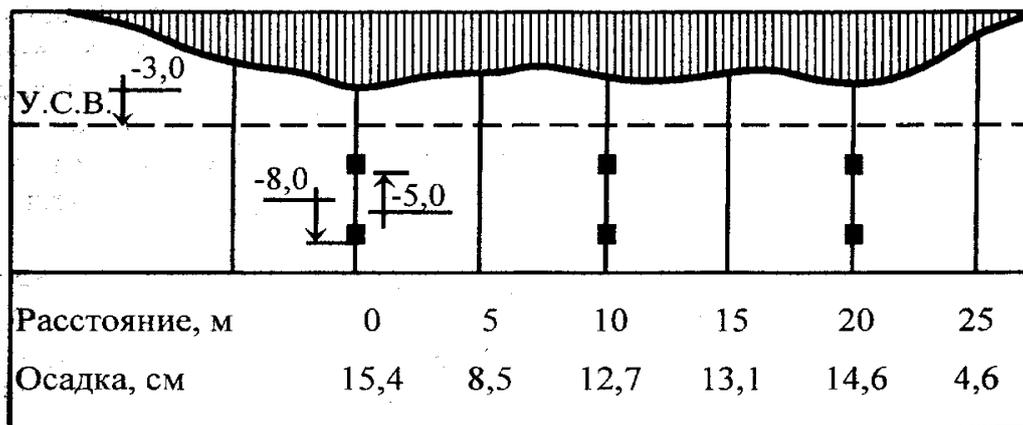


Рисунок 2. Осадка поверхности при уплотнении опытного участка

До и после уплотнения взрывами на глубину 9-10м проводилось зондирование коническим зондом диаметром 74мм ударами груза массой 50кг, падающего с высоты 70см. Установлено, что число ударов на каждые 10см погружения конуса увеличивалось с 3-5 до 7-10. После взрывов во всех зондировочных скважинах ниже горизонта грунтовых вод отмечено увеличение плотности песка, ни в одном месте число ударов не было меньше, чем до взрывов.

В 1953г. на строительстве Горьковской ГЭС сотрудниками лаборатории грунтов ЛПИ выполнено большое число поверхностных взрывов [14]. Одиночные и групповые взрывы на поверхности свеженамытых песков в отличие от поверхностных взрывов в естественных песках района обуславливали возникновение областей разжижения и уплотнения песка.

При возведении песчаной намывной левобережной плотины Горьковской ГЭС выемка залегающих в основании илистых грунтов

выполнялась плавучими земснарядами на глубину 4-8м. В результате образовалась заполнения водой прорезь шириной более 150м, которая затем была замята мелкозернистыми песками, содержащими 60-80 % фракций крупностью 0,25-0,1мм и 1-1,5% фракций менее 0,01мм. При намыве в стоячую воду песок укладывался весьма рыхло, и, по данным измерения электрометрическим методом, его пористость достигла 45%. В связи с этим возникали опасения в устойчивости рыхлого основания и возводимой на нем песчаной плотины.

После намыва на ряде карт было выполнено уплотнение рыхлых песчаных грунтов глубинными взрывами. В месте уплотнения слой рыхлых, намывных в воду песков достигал 8м. Горизонт грунтовых вод находился на 1м ниже поверхности грунта.

Для погружения зарядов в грунт на глубину 6м бурили скажины диаметром 137мм. Заряды массой 5кг помещали в отрезок тонкостенной трубы. В основание трубы забивали деревянную пробку, которую заливали расплавленным битумом. После погружения зарядов обсадные трубы извлекали и скважины заполнялись песчаным грунтом.

В первой серии было одновременно взорвано четыре заряда массой по 5кг. В тех же местах были взорваны такие же четыре заряда второй очереди.

В момент взрыва зарядов каждой серии в месте погружения зарядов наблюдался небольшой кратковременный подъем поверхности грунта. После выхода в устье скажины сосредоточенного потока газов взрыва происходило опускание поверхности, образование трещин в неводонасыщенной части грунта и возникали гейзеры. После взрывов

поверхность грунта стала более ровной.

Средняя осадка площадки между скважинами при первом взрыве достигла 45см, а после второго взрыва увеличилась еще на 20см. Осадка поверхности грунта между скважинами была весьма равномерной и распространялась в стороны на большие расстояния. Значительная величина осадки объясняется большой рыхлостью укладки и неустойчивостью структуры песка.

В неводонасыщенной части плотины, в центре и на откосе между скважинами для зарядов было пройдено два шурфа на глубину до 5м, из которых до взрывов через каждые 0,5м были отобраны кольцевые пробы ненарушенной структуры. После взрывов рядом были вновь пройдены шурфы и отобраны пробы. Средняя пористость песка по глубине в центральном шурфе до взрыва была 39,2 %, а после взрыва 39,9 %, а в шурфах на откосе соответственно 40,6% и 40%. Это подтвердило, что осадка поверхности плотины происходила вследствие уплотнения песчаного основания.

В работе [15] представлены результаты при уплотнении участка плотины Каховской ГЭС. Подводная часть русловой плотины намывта под защитой верхового банкета практически в стоячую воду. Поэтому мелкозернистые пески уложились весьма рыхло при средней плотности скелета $1,53\text{г/см}^3$. Намытые пески весьма однородные с содержанием 70-80% фракций 0,25-0,1мм, 20-30% фракций 0,5-0,25 и 2-8 % фракций, меньших 0,1мм.

В связи с весьма рыхлой укладкой принято решение уплотнить низовую берму русловой подводной части плотины. Для выбора метода уплотнения намывтых под воду песков

геотехнической станцией Днепропетровского института железнодорожного транспорта проведены опыты по уплотнению их виброштыкованием, глубинными вибраторами И-86, плитой с вибратором ВПП-2 и камуфлетными взрывами. Установлено, что наиболее целесообразно и экономично уплотнение грунта глубинными взрывами.

При взрывах массой 1кг на глубине 5м осадка в радиусе 6-7 м достигла 10-15см. В шурфе, пройденном под защитой иглофильтров, плотность скелета грунта в результате одной серии взрывов достигала $1,61 \text{ г/см}^3$.

После проведения опытных взрывов низовая берма русловой плотины шириной 30-50м была уплотнена одной серией глубинных взрывов зарядов массой 1кг, расположенных на расстоянии 10м один от другого. Уплотнение бермы взрывами позволило создать надежное основание под дренажную призму, а также создать упор из плотного песка для всей подводной части русловой плотины.

В 1960г. были выполнены работы по уплотнению мелкозернистых песков в районе г. Питсфильда (США) [16]. Необходимо было возвести три опоры линий электропередач высотой 22-38м в пойме реки Хаусытоник.

В основании до глубины 30м залегал слой рыхлых однородных во-донасыщенных мелкозернистых, местами тонкозернистых песков. По данным проходки шурфов и взятия образца ненарушенной структуры, средняя плотность скелета песка составляла $1,35 \text{ г/см}^3$.

При устройстве фундамента неглубокого заложения на естественном песчаном основании, чтобы избежать непредвиденного разжижения

водонасыщенного песчаного грунта и осадки сооружения при вибрации или внезапном взрыве, произвели предварительное уплотнение рыхлого основания глубинными взрывами.

Минимальная глубина уплотнения от спланированной поверхности 6м. Заряды 60 %-ного динамита массой 1,8кг на глубину 3,6м погружали подмывом. После погружения заряда обсадную трубу выдергивали, а скважину засыпали песком.

Для насыщения водой песчаного грунта, находящегося выше горизонта грунтовых вод, площадку залили водой. Для этого вокруг уплотняемой площадки устраивали обваловывание из менее водонепроницаемого снятого растительного слоя. Образовавшийся прудок поддерживался весь период уплотнения и двое суток перед началом взрывных работ.

На площадке опоры произведено три серии взрывов, причем в каждой из них взрывали по восемь зарядов. Для обеспечения полной осадки поверхности в течение дня выполняли только одну серию взрывов. Величина осадки в центре уплотняемого участка после трех серий взрывов достигла 45см. При проходке шурфов средняя плотность скелета грунта в результате взрывов возросла с 1,35 до 1,45 г/см³.

В работе [17] приведены данные по уплотнению основания Карна-фульской плотины (США). Одно из основных сооружений гидроузла - земляная укатанная плотина с глинистым ядром, основание которой в период муссонных паводков на участке переменного отводящего канала было размыто на глубину свыше 20м. В месте размыва даже в сухой период года глубина воды достигала 27м.

Для заполнения участка размыва мелкозернистый песок доставляли на барках и смывали в воду гидромониторами. Чтобы уменьшить содержание пылеватых фракций, естественный песок перед укладкой промывали. Частицы песка, осаждаясь в стоячей воде, создавали малоустойчивую рыхлую структуру грунта. По результатам шурфования на глубину до 6м средняя плотность песка составляла $1,5 \text{ г/см}^3$, тогда как в плотном состоянии она достигала почти $1,78 \text{ г/см}^3$.

Уложенную толщу грунта уплотняли глубинными взрывами. Заряды изготавливали из патронированного 30%-ного нитрожелатиндинамита. В верхней части заряда помещен электродетонатор. Заряды опускали в скважины, обсаженные трубами диаметром 7,2см. После погружения зарядов обсадные трубы выдергивали.

Заряды массой 3,6кг располагали в три яруса: первый ярус от поверхности грунта на глубине 4,5м, второй - на глубине 10м и третий - на глубине 15м. Заряды размещали по сетке 6х6 м.

Для контроля за осадкой поверхности грунта стальные штампы размерами в плане 30х30см с приваренными в центре стержнями устанавливали на глубине 20см от поверхности грунта, и по стержням вели нивелировку до и после взрывов. Осадка поверхности достигла 30см, средняя осадка по данным 23 штампов после всех взрывов составляла 5,4% от всей толщины уплотняемого слоя. Так как дно воронки размыва состояло из малосжимаемых полускальных грунтов, то в качестве уплотняемой толщи принят весь слой намытых песков. Полученная осадка соответствует среднему измерению плотности всей толщи грунта с $1,5$ до $1,59 \text{ г/см}^3$.

После взрывов трех ярусов зарядов средняя осадка составляла 4,6 % от толщины всего слоя песка, и взрыв одного яруса мало увеличивал осадку. В большинстве случаев на одном участке было достаточно трех серий взрывов.

В результате проходки шурфов по взятым пробам установлено, что средняя плотность скелета грунта увеличилась после взрыва нижнего яруса зарядов до $1,53 \text{ г/см}^3$, а после всех серий взрывов - до $1,56 \text{ г/см}^3$. Кроме того, выполнялся контроль уплотнения песка путем ударного зондирования слоя грунта. После проведения взрывов необходимое число ударов для проникания зонда с коническим наконечником было значительно выше, чем при испытаниях, проведенных до взрывов.

Обработка приведенных данных показывает, что осадка поверхности возрастает с увеличением глубины уплотняемого слоя до 7м, и средняя осадка достигала 7%. Дальнейшее увеличение уплотняемой толщи не приводило к увеличению осадки, что свидетельствует о сохранности структуры песка на этих глубинах. Взрывы зарядов массой 3,6кг на глубинах 10-15м практически не вызывали дополнительного уплотнения грунта.

В работе [18] приведены результаты по уплотнению намытых песчаных грунтов гражданских сооружений. Уплотнение глубинными взрывами проводилось на семи объектах.

Слой намытых однородных мелкозернистых малоокатанных толщиной 3м характеризовался содержанием фракций: 0,1-0,05мм - 0-7%, 0,1-0,25мм - свыше 80%, остальные фракции были крупнее 0,25мм. В результате взрывов намытая территория дала осадку 12-19см. По взятым до и после взрывов

образцам ненарушенной структуры плотность скелета грунта в среднем изменилась с 1,6 до 1,7 г/см³, что соответствовало изменению степени плотности сложения с 0,65 до 0,9. По данным ударного зондирования, число ударов на каждые 10см погружения зонда возросло с 1-1,5 до 5-10.

На другом объекте этого района проведено уплотнение глубинными взрывами слоя намытых отходов флотационного обогащения руды (хвостов), представляющих собой малоокатанные мелкозернистые, среднезернистые пески с содержанием фракций 0,15-0,4мм более 80%. Слой рыхлых песчаных грунтов достигал 12м, а горизонт грунтовых вод был ниже поверхности грунта на 0,9м. В дальнейшем на уплотненном основании были возведены жилые дома.

Заряды из 60%-ного патронированного динамита массой около 2кг закладывали на глубину 5-5,5м так, чтобы они располагались посредине уплотняемого слоя. Заряды вставляли в обсадные трубы диаметром 2", предварительно погруженные в грунт путем подмыва. После опускания заряда обсадные трубы извлекали, а скважина заплывала или ее засыпали песком. Для контроля за уплотнением пьезометры были заглублены в грунт на 6м. Провода от электродетонаторов соединяли с распределительным щитом и все заряды взрывали последовательно. Каждый последующий взрыв был проведен после некоторого спада избыточных давлений, вызванных предыдущим взрывом.

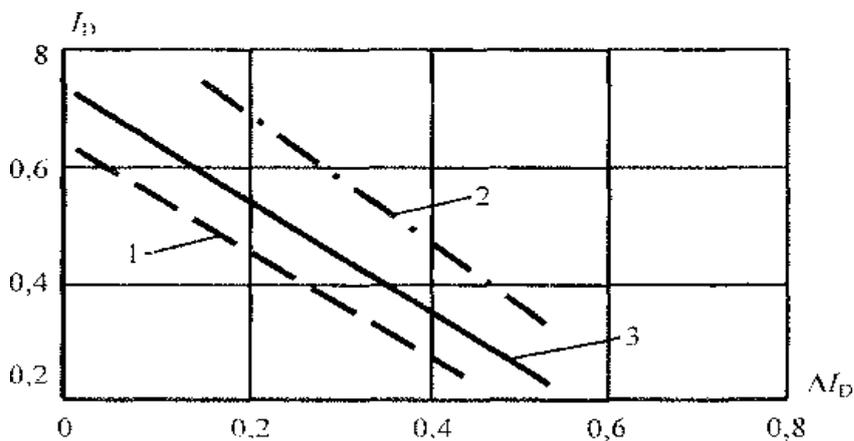
Взрывая последующие заряды до полного прекращения уплотнения грунта от предыдущего взрыва, обеспечивали большее разрушение структуры грунта. Осадка поверхности грунта в

центре каждой уплотняемой площадки составила 60см. Степень плотности сложения песка возросла с 0,25 до 0,96.

При выбранной массе заряда и глубине горизонта грунтовых вод около 1м радиус распространения осадки достигал 15м, а максимальное понижение поверхности наблюдалось на расстоянии до 9м от места взрыва. Поэтому при взрывании нескольких групп зарядов, образующих в плане замкнутый контур, эффект уплотнения был бы, по-видимому, большим, и расстояние между зарядами могло бы быть увеличено.

Кроме того, на ряде объектов было определено увеличение степени плотности I_D в зависимости от ее начальной величины и гранулометрического состава грунта.

На рисунке 3 приведены графики приращения степени плотности сложения.



1 - пылеватый мелкозернистый; 2 - мелкозернистый; 3 - среднезернистый

Рисунок 3. Приращение степени плотности сложения ΔI_D при уплотнении грунта глубинными взрывами

В большинстве случаев конечная степень плотности сложения превышала 0,75, а в ряде случаев достигала 0,9. Причем с увеличением крупности несвязного грунта степень плотности сложения несколько возрастает.

Приведенные данные о достигнутых в результате небольшого числа серий последовательных взрывов величинах степени плотности сложения 0,8-0,9 и более несколько оптимистичны. Возможно, что при лабораторном исследовании в плотном состоянии пески недостаточно уплотняли, что и обусловило завышение значения I_D до и после уплотнения песков взрывами.

Начиная с 1960 года, уплотнение глубинными взрывами использовалось рядом фирм США в различных штатах. Так, например, в штате Флорида проведено испытание по уплотнению среднезернистого песка намывной дамбы [19].

В работах [20, 21] в результате лабораторных и полевых исследований по уплотнению водонасыщенных песков взрывами установлено, что явления, возникающие при взрывах в рыхлых водонасыщенных песках, отличаются от наблюдавшихся в неводонасыщенных или связных грунтах.

В работах [22, 23] были получены основные представления о процессах разрушения структуры, разжижения и уплотнения водонасыщенных песчаных грунтов в результате действия взрыва.

1.2 Анализ практики уплотнения грунтов подводными взрывами

В работе [24] описано уплотнение основания мола в г. Новороссийске в 1964г. В основании каменной постели строившегося мола нефтегавани залегали крупнозернистые пески с включением ракушки и гальки, местами гальки и щебня. Ниже залегали слои слабоокатанного щебня с гравийным заполнителем и прослойками глинистых включений, а также слоя щебня с глинистым заполнителем и слоя песка со щебнем. Толща песчаных, гравелистых и щебеночных отложений, достигающая в головной части мола 8м, подстилалась слоями мергелей и песчаников.

Вследствие рыхлой укладки отсыпанного в воду камня и наличия большой толщи гравийно-щебеночных грунтов при строительстве наблюдались осадки кладки мола, достигавшие на отдельных секциях 50см. Установлено закономерное увеличение осадок и их длительности с увеличением толщи сжимаемых грунтов и постели от корневой части мола к головной. Для уменьшения последующих осадок перед возведением верхнего строения мола была выполнена отгрузка секций.

При переходе к строительству головной части мола с более мощной толщей каменной постели для уменьшения величин возможных осадок и их длительности летом 1964г. было проведено уплотнение подводными взрывами каменной постели. В период уплотнения взрывами было

выполнено глубокое равнение каменной постели части секций, тщательное равнение каменной постели. Толщина каменной наброски достигала 4,5м, а мощность песчано-щебенистых слоев составляла 7-8м.

Для замера осадок на поверхности каменной постели на различных расстояниях от края секции были установлены железобетонные плиты размерами в плане 0,45x1,0м и толщиной 0,08м. Плиты опускались с катера в намеченном месте на пеньковом канате, тщательно укладывались водолазами и нивелировались до и после каждой серии взрывов.

Заряды располагались по сетке 7x7 м. Заряды тротила массой 20кг каждый подвешивали к поплавкам на глубине около 12м и на высоте 2,5м от поверхности постели и взрывали по сериям. В результате четырех серий взрывов средняя осадка плит, расположенных под зарядами или в пределах области уплотнения, достигла 70см. С увеличением расстояния от места взрыва осадка постели постепенно уменьшалась. На основании полученных данных можно считать, что осадка постели в пределах контуров расположения зарядов достигала 80см.

По мере увеличения числа взрывов наблюдалось постепенное затухающее накопление осадок поверхности каменной постели. Наиболее интенсивно осадки затухали на участках, удаленных от места взрыва. Основная часть осадки происходила в результате трех серий взрывов. Первый

производственный опыт использования подводных взрывов для уплотнения рыхлых грунтов показал их высокую эффективность.

В той же работе [24] приведены данные по уплотнению каменной постели стенки в Новороссийске подводными взрывами. Каменная постель из мергеля толщиной 3м была отсыпана для устройства основания ограждающей стенки пирса. В основании постели залежали плотные глинистые грунты, которые практически не уплотнялись действием динамических нагрузок.

Глубина воды в месте уплотнения постели достигала 10,5м. Масса заряда 10кг. Высота подвески зарядов над поверхностью каменной постели 1,7м, расстояние между зарядами 4м.

Использование замедленного способа взрывания позволило уменьшить воздействие ударных и сейсмических волн на построенную часть стенки, которая находилась от места на расстоянии 18 м. Для замера осадки поверхности постели внутри контура уплотнения устанавливали плиты. План расположения зарядов и плит и график осадки поверхности показан на рисунке 4.

Осадка поверхности постели внутри контура уплотнения достигала 32 см и, постепенно затухая, распространилась на расстояние 18м от крайних зарядов. Стенка пирса осела на 2см.

В работе [25] применены подводные взрывы для уплотнения лессовых просадочных грунтов мощностью 15-20м в Приташкентском районе на террасе р. Чирчик.

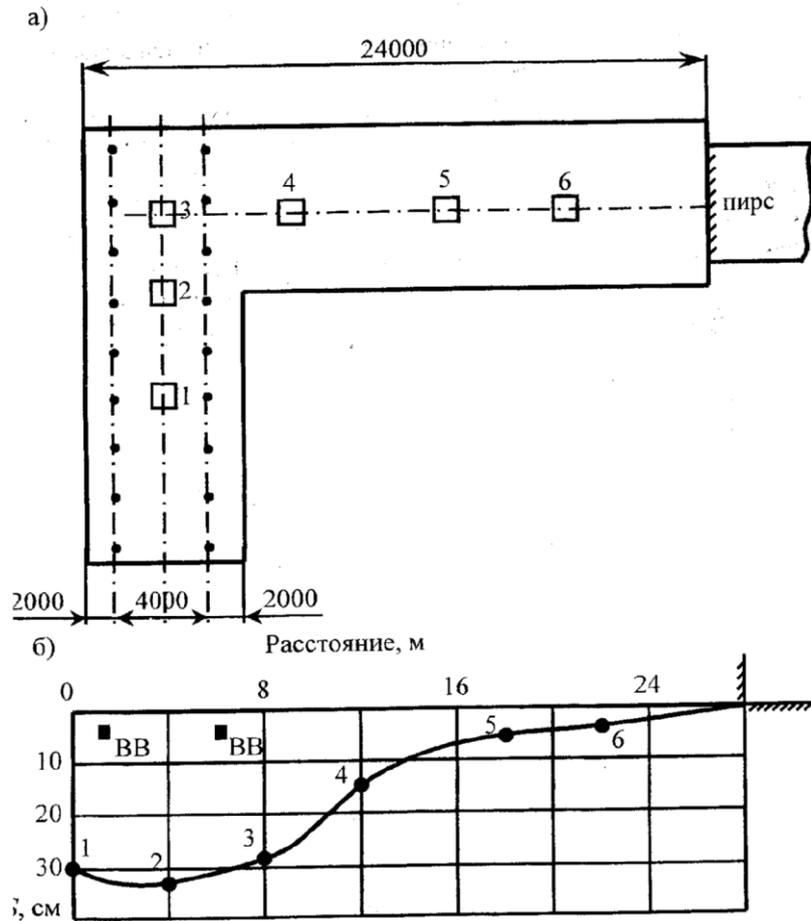
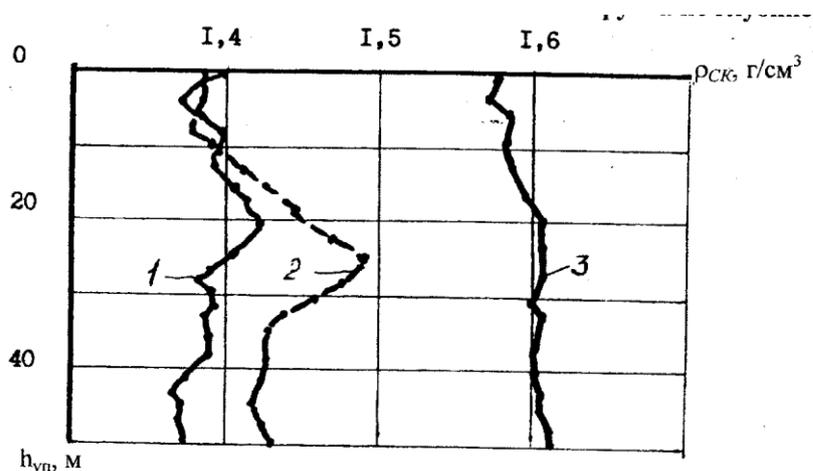


Рисунок 4. План расположения зарядов и плит и график осадки поверхности каменной постели при уплотнении ее подводными взрывами

Для замачивания грунта и создания слоя воды сооружали котлованы глубиной 1 м с устройством обваловывания. Глубина воды в котловане достигала 2 м. Замачивание котлована длилось 20 суток, за этот период успевали стабилизироваться просадки грунта под действием собственного веса. Характерно, что в верхней части слоя (около 2,5 м) при замачивании не изменялась плотность скелета грунта (рисунок 5).



1 - до замачивания; 2 - после замачивания;
3 - после взрывов

Рисунок 5. Изменение объемной массы скелета лессового грунта по глубине

После замачивания, вода несколько дней в котлован не подавалась, что по мнению авторов, должно было снизить степень влажности (степень водонасыщения) до 0,7, т.е. сохранить 20-30% объема пор заполненными газом. Затем котлован заполнялся водой и сразу же выполнялись взрывы погруженных в воду зарядов из аммонита при расстоянии между зарядами 0,8м. Заряды располагались в двух вариантах: в первом заряды подвешивались в воде на расстоянии 0,5м от поверхности грунта; во втором - укладывались на поверхности дна котлована.

По результатам отбора образцов грунта до и после взрывов сделан вывод об увеличении плотности скелета грунта по всей исследованной глубине (5м). В среднем плотность скелета возросла с 1,44 до 1,64 г/см³. Относительная просадочность при нагрузках 0,2 МПа уменьши-

лась в 1,5-6 раз. Осадка поверхности грунта в котловане составила 20-30см. Обращает на себя внимание несовпадение осадки с изменением плотности скелета до и после взрыва, которая соответствует осадке порядка 10% от мощности уплотняемого слоя, т.е. по величине изменения плотности скелета она должна быть больше 50см.

Как показали проведенные испытания, масса зарядов и их расположение относительно поверхности дна котлована несущественно влияли на изменение плотности грунта в пределах исследованной толщи.

Авторы отмечают, что после взрывов в котловане в течение 7-10 дней оставалась практически на одном уровне, и для отбора образцов не пришлось ее удалять. Это свидетельствует об уменьшении коэффициента фильтрации грунта и калематации мелкими частицами пор граничных слоев грунта при взрыве.

В работах [26, 27] используется уплотнение песчаных оснований портовых сооружений подводными взрывами. В Северном порту Гданьска в 1973г. на участке строительства волнолома с заменой илов и слабых глин были уплотнены отсыпанные в воду пески. В результате подводная выемка длиной 700м и шириной 32-35м была заполнена мелкозернистым песком, образовавшим подушку толщиной 2-5,5м.

Схема расположения зарядов в плане и по глубине была аналогична применявшейся в Новороссийске. Заряды располагались по сетке

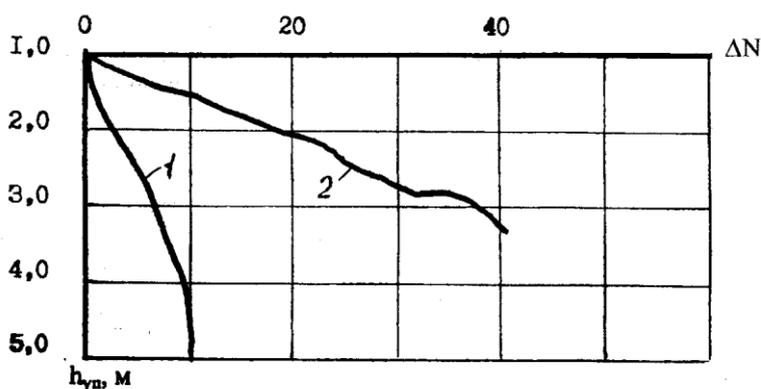
10x10 м и выполнены четыре серии взрывов.

Осадка поверхности по установленным на поверхности песка бетонным плитам размером 0,5x0,5x0,1м составила 30-50см. Об изменении плотности песка судили по данным ударного зондирования до и после взрывов. Забивка зонда с крестообразным наконечником выполнена под водой из специальной кабины. Число ударов на каждые 10см погружения зонда переводили в значения степени плотности сложения песка.

Расход тротила на 1м^3 уплотненного грунта составил 0,23кг. На работы по уплотнению всего участка с объемом грунта 71000м^3 затрачено 36 рабочих дней. Средняя осадка на первом участке составляла 9% от толщины уплотняемого слоя песка, а на втором достигала 12%. По подсчетам авторов статей, такая осадка обусловила достижение песком после четырех серий взрывов степени плотности сложения около 0,9. Однако пересчет степени плотности сложения от начальной, равной 0,1 или 0,25, при относительной осадке 9-12 %, выполненный в предположении, что пористость в рыхлом и плотном состояниях для обычных мелкозернистых песков изменяется на 12-13%, приводит к выводу о возрастании степени плотности сложения песков после взрывов до 0,54-0,81. Эти величины следует считать более вероятными, а возрастание степени плотности сложения мелкозернистых песков основания в районе порта можно принять с 0,2 до 0,7.

По результатам ударного зондирования степень

плотности сложения до глубины 1м увеличивалась в среднем до 0,67, а на глубине 1-2,5м достигали 0,9 (рисунок 6). Глубже ударное зондирование после взрывов не выполнялось.



ΔN - число ударов на 10 см погружения зонда;
1 - до взрыва; 2 - после взрыва

Рисунок 6. Результаты ударного зондирования толщи намывных песков до взрыва

Уплотнение основания подводными взрывами выполнено также на строительстве набережной в порту Гдыня. Взрывы выполнены на участке длиной 80м и шириной 50м, сложенном на глубину 2-3,5м среднезернистыми, намывными в воду песками. Ниже залегали тонкозернистые естественные пески. Глубина воды на этом участке составляла 10-11м.

Заряды четырех серий взрывов располагали в плане по сетке 7x7 м. Малое число взрываемых зарядов определялось требованиями техники безопасности работ на рядом расположенных сооружениях и обеспечением бесперебойной навигации. Расход тротила на 1м^3 уплотняемого грунта составил 0,054кг. На уплотнение 20300м^3 грунта было затрачено шесть дней.

Осадка различных точек поверхности песка менялась от 21 до 67см, в среднем по всей площади составляла 40см. Результаты ударного зондирования свидетельствовали об уплотнении всего исследованного до глубины 5м слоя песчаного грунта.

Авторы статей пришли к выводу, что в условиях уплотнения намывных под воду очень рыхлых песчаных грунтов глубина уплотнения и радиус эффективного действия заряда могут быть увеличены. Предлагаемое увеличение коэффициента расчетной глубины уплотнения слишком велико и не обосновано приводимыми в статье данными.

Определенные сомнения вызывает утверждение, что линейное расположение одновременно взрывааемых зарядов дает больший эффект уплотнения, расположение их по замкнутому контуру. Возможно, на полученные результаты в части величин относительных осадок повлияли местные условия напластования и укладки грунтов.

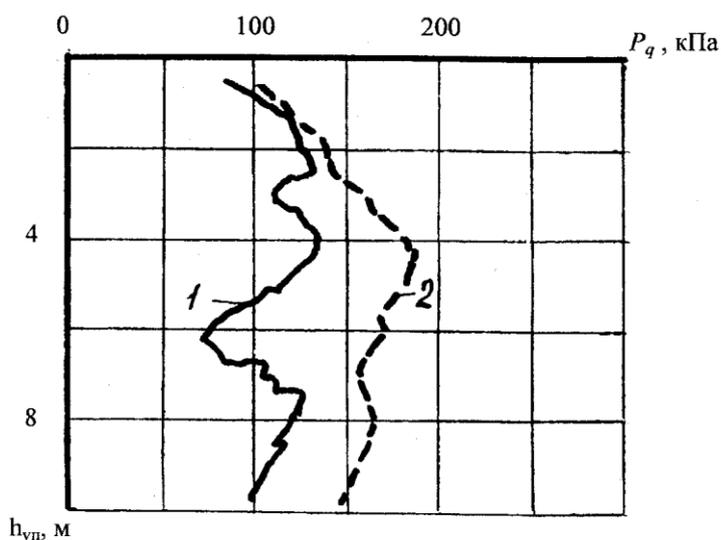
В работе [28] приводятся данные по уплотнению намывных песков в порту Бордо (Франция). Среднезернистые, очень однородные пески намывы толщиной 10м на илистых отложениях в дельте реки Жардон. Горизонт грунтовых вод находился на глубине 1,5м. По данным испытаний намывных песков статическим пьезометром, степень плотности их сложения в среднем составляла 0,48, а по испытаниям прессиометром - косвенно оценивалась величиной 0,5-0,74, т.е. пески средней плотности.

Заряды взрывали последовательно один за другим. Выход отжимаемой воды после каждого взрыва продолжался около 20 минут, а осадка полностью затухала через 1-2 дня.

Результаты статического зондирования толщи каждого участка до и после взрыва приведены на рисунке 7. Аналогичные результаты получены и по данным испытаний толщи прессиомером.

На всех участках практически не уплотнялись верхние 2м неводонасыщенного грунта. Наилучшие результаты получены при ярусном расположении зарядов. В этих условиях наиболее эффективен расход ВВ 42 г/м^3 и сетка зарядов через 5м. Точки зондирования до и после взрывов были расположены в плане далеко одна от другой и поэтому их трудно сопоставлять. Кроме того, на участке проведена только одна серия взрывов.

Были проведены опыты: на половине каждого участка между зарядами были установлены перфорированные трубы - вертикальные дрены, облегчающие отжатие воды при уплотнении песка.



1 - до взрыва; 2 - после уплотнения взрывом

Рисунок 7. Изменение сопротивления P_q до и после уплотнения взрывом

После взрывов из них на высоту более 2м били

фонтаны воды. Однако, как и следовало ожидать, какого-либо влияния их на изменение характеристик песков по результатам пенетрации и прессиометрии обнаружено не было. После разжижения относительно маловодопроницаемого песчаного грунта некоторое ускорение процесса его консолидации дренами не могло повлиять на характер переформирования его структуры.

В работах [29,30, 31] представлены результаты по уплотнению намывной территории в г. Ленинграде в 1973-75 гг. Эти работы проводились с целью создания основания для ведения жилищного строительства и сооружения фасада города со стороны морского порта. Часть территории создана путем намыва протоки р.Невы между оградительными дамбами практически в стоячую воду глубиной 7м.

Грунты при намыве в стоячую воду укладывались весьма рыхло. Взрывное зондирование участков подводного намыва подтвердило малую плотность укладки и способность грунтов переходить в разжиженное состояние. В связи с этим потребовалось уплотнять участок замыва протоки глубинными взрывами.

Взрывы выполнены с помощью электродетонаторов группами по 8-10 зарядов. На ряде участков взрывались одиночные заряды с интервалом в несколько десятков секунд. Через несколько десятков минут после взрыва по всей площади участка уплотнения наблюдался интенсивный выход воды, местами в виде гейзеров. Осадка поверхности

в основном заканчивалась в течение одних суток, но некоторое накопление осадки продолжалось в течение трех-четырех дней (рисунок 8).

На погружение заряда, забивку трубы и на извлечение уходило 3 минуты. С учетом различных потерь времени производительность одного агрегата достигала за смену 9-11 тыс. м³ уплотненного грунта.

К последующей очереди на участке уплотнения приступали через один-два дня. Однако выход воды и ее скопление в пониженных уплотнением участках затрудняли работы. Поэтому на ряде участков воду отводили канавами.

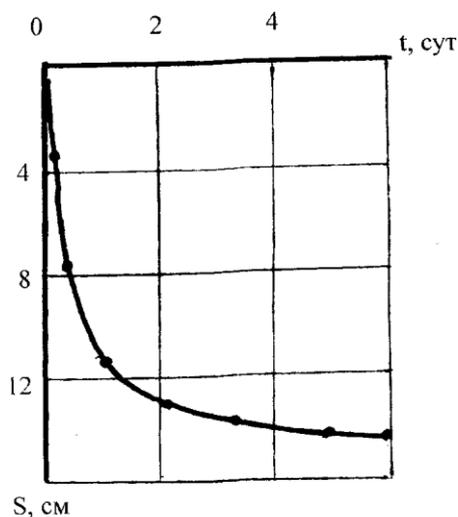


Рисунок 8. График осадки поверхности намытого грунта после первой серии взрывов

Основной контроль уплотнения выполнен по замерам осадки нивелировкой поверхности по сетке 10x10 м. Контрольная нивелировка выполнялась в основном через 10-15 дней, окончательная - через месяц после взрывов. Средняя осадка по всей площади составляла 30 см. В зависимости от

мощности намытого под воду грунта средние осадки по участкам достигали 40 и 50 см. В основном осадка поверхности характеризовалась значительной равномерностью. Средняя относительная осадка по всей площади составила 5%, а с учетом только намытой под воду толщи грунта 7-8%.

В работе [32] рассмотрены результаты по уплотнению золошлакоотвала в 1979 г. Золо и шлаки ТЭЦ г. Москвы были намыты до 1947 г. в бывший песчано-гравийный карьер. Опытные работы по уплотнению взрывами толщи золы проведены Гидроспецпроектом в связи со строительством на отвале сооружений мазутного хозяйства.

Участок опытного уплотнения прудковой части золоотвала сложен водонасыщенной пылеватой золой, по гранулометрическому составу соответствующей пылеватым пескам. Плотность скелета золы 0,55-0,78 г/см³, пористость 63-77%, а модуль деформаций 2,5-3,5 МПа. В основании золошлакоотвала залегают древнеаллювиальные пески различной крупности.

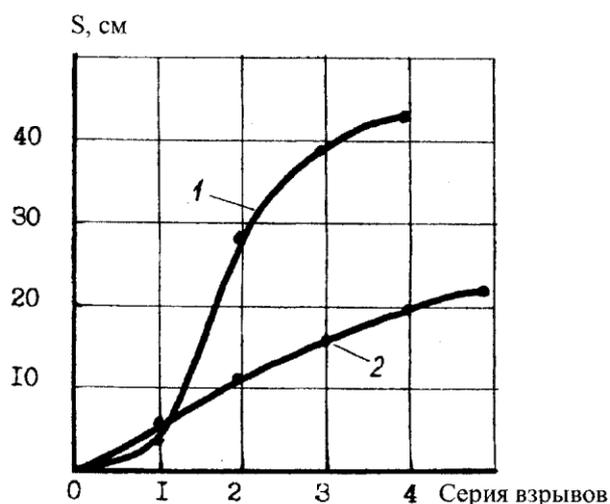
Заряды массой 3 кг из аммонита погружали в обсадные трубы на глубину 2,5-4,5 м. Перед каждой серией взрывов массив в течение одних - двух суток замачивали водой: на поверхности участка слой воды составлял 0,2 - 0,4 м.

Суммарная осадка участка достигала 43 см, а относительная - 9,6%. По результатам шурфования плотность скелета зольных отложений возросла на 18%, пористость на 14%, а модуль деформаций увеличился до 6 МПа. Угол внутреннего трения возрос с 18 до 21°, а сцепление - с 0,022 до 0,035 МПа.

На графике средних осадок в зависимости от

числа серий взрывов отмечается увеличение осадок после второй серии взрывов (рисунок 9).

Увеличение осадок можно объяснить разрушением при первом взрыве структурных связей между частицами золы, образовавшихся более чем за тридцатилетний период существования золоотвала. Однако осадка на участке надводного намыва определяется присутствием шлаковых отложений и упрочненных слоев воды с модулем деформации более 60 МПа.



1 - прудковая зона; 2 - надводный намыв

Рисунок 9. Зависимость средних осадок поверхности двух опытных участков золоотвала от числа серий взрывов

Таким образом, первый опыт уплотнения взрывами золошлаковых отложений показал их эффективность, особенно в зонах подводного намыва. Уплотнялся весь старый золоотвал: в условиях свеженамытых зольных отложений эффект уплотнения взрывами должен быть значительно большим.

В работе [33] приведены результаты опытного

уплотнения грунтов хвостохранилища в Канаде. До глубины 7м участок уплотнения сложен хвостами (пылеватыми песками и супесями), подстилаемыми плотными ледниковыми отложениями. Максимальная осадка после трех взрывов достигла 80см, но радиус эффективного действия получился сравнительно небольшим (около 4м).

Для проведения работ на поверхность слабых хвостов был уложен слой крупнозернистого грунта (пригрузка) толщиной 1м, вызвавший осадку толщ хвостов величиной 0,2м. В результате завышенных расстояний осадка поверхности участка была неравномерной (от 5 до 60см). Тем не менее, контроль плотности сложения отбором проб грунтоносом и ударным зондированием свидетельствовал об уплотнении всего участка. Степень плотности возросла с 0,41 до 0,68, а среднее число ударов для погружения стандартного зонда - с 6 до 11.

В 1967г. Л. Г. Кузовлевым на полуострове Мангышлак проведены опытные работы по уплотнению глубинными и подводными взрывами толщ просадочных песчаных грунтов [34]. Для подводного взрывания мелких зарядов ВВ участок уплотнения обваловывался и полученный котлован предварительно заполнялся водой.

Уплотнение несвязных грунтов при взрывах исследовано одновременно с развитием полевых и лабораторных исследований разжижения и уплотнения водонасыщенных несвязных грунтов при других, близких по характеру, динамических воздействиях (удары, фильтрационные силы, вибрации), основные результаты которых приведены в работах [35-44].

1.3 Анализ практики уплотнения взрывами просадочных грунтов

В 1964г. И.М. Литвиновым был применен способ глубинных взрывов для уплотнения водонасыщенных лессовых просадочных грунтов [45]. В 1967г. под руководством И. М. Литвинова было произведено уплотнение просадочных лессовых грунтов основания пятиэтажного дома в г. Запорожье. Глубинные взрывы были применены для уплотнения 20-метровой просадочной толщи, состоящей из слоев лесса и лессовидного суглинка с естественной влажностью 9-19%, пористостью 40-43% и относительной просадочностью 0,01-0,1 при нагрузке 0,3 МПа.

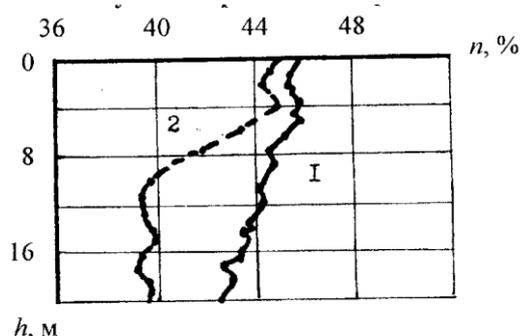
Уплотняемый участок размерами в плане 17x132 м был разделен на три захватки примерно одинаковой длины. В связи с тем, что участок расположен в застроенном районе, для предотвращения распространения просадки при замачивании и уплотнении взрывами в сторону, его оградили прорезанными в грунте контурными траншеями глубиной 6 и шириной 0,4м.

Для замачивания основания по сетке 3x3 м устраивались дренажные скважины глубиной 12 и диаметром 0,4м, заполнявшиеся шлаковым щебнем. Расход воды при замачивании составлял 4-7м³ на 41м³ уплотняемой площади, а продолжительность замачивания достигала 6 суток. Осадок поверхности грунта за весь период замачивания не наблюдалось.

На рисунке 10 представлены графики изменения пористости по глубине до и после уплотнения.

Средняя осадка поверхности к моменту окончания работ достигла 127см. Осадка

поверхности была достаточно равномерной и практически не распространялась за пределы контуров траншеи и экранов. Осадка глубинных реперов свидетельствует, что наибольшие деформации грунта происходили в пределах слоя на глубине от 10 до 20м.



1-до уплотнения: 2 - после уплотнения взрывами

Рисунок 10. Изменение по глубине пористости n при давлении 0,3 МПа

В работе [46] приведены результаты уплотнения лессовых грунтов на строительстве Грозненского газоперерабатывающего завода. Просадочная толща грунтов составляла 8-14м. Общий объем уплотненного грунта превысил 1 млн. м³.

После бурения скважин диаметром 400мм и глубиной 2/3 просадочной толщи в них установили трубы для зарядов диаметром 100мм, затем поглощающие скважины засыпали песком. Заливка скважин водой выполнялась в течение трех суток из расчета 0,3-0,4м³ на 1м³ уплотняемого грунта.

После взрывов поверхность грунта в течение нескольких часов дала осадку на 1м (при уплотненной толще 10-12м), а затем в течение ме-

сяца осадка в основном стабилизировалась, достигнув 140см, или 10-14% мощности слоя уплотняемого грунта (рисунок 11).

При отсутствии песчано-гравийной подушки сразу же после взрывов отжимаемая из пор вода выходила на поверхность и в течение двух-трех дней профильтровала основание.

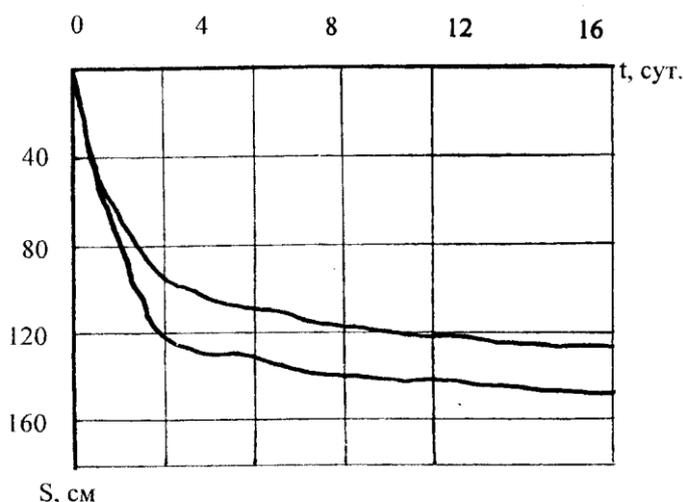


Рисунок 11. График осадки во времени поверхности участка

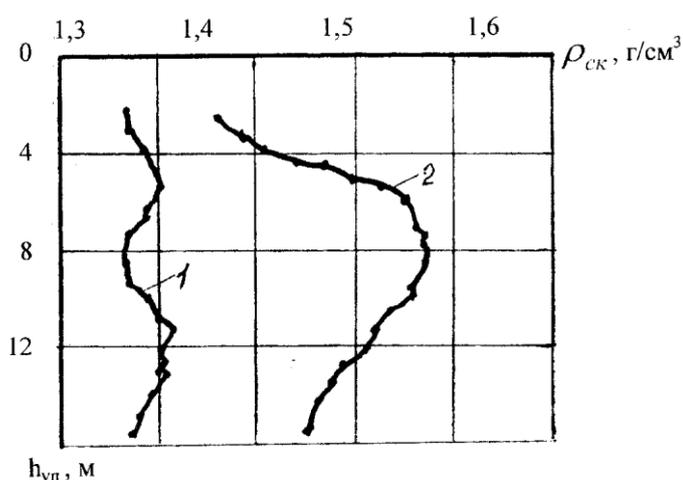
Осадку возведенных на уплотненных грунтах сооружений завода в течение годичного срока после сдачи их в эксплуатацию не превысила 1,5см. В работе [47] производилось уплотнение грунтов глубинными взрывами площадки под 16-ти этажное здание в г. Русе (Болгария). Грунты оснований представлены мощной толщей (25м) лессовых грунтов. Глубина просадочных лессов достигает 13м. Просадка при опытном замачивании достигала 15см.

Замачивание производилось в течение пяти-семи дней. Заряды располагали в плане через 4-8м один от другого. Глубина заложения зарядов составляла 0,6-0,7 от толщи просадочных лессов.

Осадка поверхности достигала 140см. Основная часть смещений поверхности происходила в течение 10-15 дней, причем в первый день - более 70%. В результате плотность скелета грунта возросла до $1,7\text{г/см}^3$, а пористость уменьшилась до 39 % (рисунок 12).

В работе [48] выполнено уплотнение лессовых грунтов в районе массива Урта-Боз Таджикской ССР. Скважины для замачивания грунта были пробурены на глубину 16м по сетке 4х4 м. Подача воды в течение шести суток достигала $0,4\text{м}^3$ на 1м^3 уплотняемого грунта. Перед началом уплотнения просадка от замачивания составила 40-60см.

Заряды установлены в трубах, совмещенных с дренажными скважинами. После взрывов суммарная осадка достигла 270см, и она стабилизировалась в течение трех-четырех дней. Причем сразу же после взрывов дополнительная осадка составляла 60% от стабилизированной. Пористость снизилась с 55 до 42%, а плотность скелета грунта увеличилась с $1,25$ до $1,65\text{ г/см}^3$.



1 - до уплотнения; 2 - после уплотнения

Рисунок 12. Изменение плотности скелета $\rho_{ск}$ лессового грунта по глубине

Для исследования влияния глубины заложения заряда на эффект уплотнения на взрывали на глубине 16, 12 и 8м. Разница в осадках поверхности соответственно 290, 280 и 250см. Поэтому исследователи пришли к выводу о возможности использования камуфлетных зарядов.

В работах [49, 50] изучался газодетонационный способ уплотнения просадочных грунтов. Эффективность использования метода газовой детонации подтверждена исследованием по уплотнению просадочных лессовых грунтов в условиях Таджикской ССР. Установка состоит из камеры сгорания и камеры поджига. Камера сгорания заполняется горючей смесью и на свечу поступает высоковольтный импульс из блока высокого напряжения. Горючая смесь воспламеняется, и горение, распространяясь по боевой линии, переходит в детонацию. В камере сгорания происходит взрыв.

Камера сгорания выполнена в виде полого стального цилиндра, верхняя часть которого имеет штуцер для подвода газовой смеси. Нижняя часть камеры сгорания открыта и имеет демпфер, предназначенный для стабилизации камеры сгорания в грунте. Уплотнение достигается введением в грунт смеси кислород-пропан и ее детонацией.

Исследования с помощью метода газовой детонации проводились на участке, который сложен четвертичными отложениями смешанного генезиса. До глубины 28-37м залегает однородная толща

лессовых грунтов, удельный вес которых довольно постоянен и меняется в пределах 26,7-26,9 кН/м³. Плотность скелета грунта колеблется от 1,24 до 1,34 г/см³.

В центре круглых котлованов бурили скважину и производили увлажнение грунта до $\omega = 22\%$ в радиусе 2,2м от центра скважины. Влажность грунта перед началом уплотнения определяли радиометрическим влагомером. Камеру сгорания на стальном тросе опускали на глубину 1м и проводили серию взрывов.

Образцы грунта отбирались пробоотборником по вертикали до 2,5м через каждые 20см и по радиусу до 2,2м. Определение уплотненной толщи грунта позволило получить зависимости от объемов камеры сгорания и числа взрывов. Плотность скелета грунта возросла до 1,4-1,6 г/см³ в зоне диаметром до 3,2м, глубиной до 2м при максимальном избыточном давлении в камере сгорания 2,0-2,4МПа.

Для определения зависимости спектра динамического воздействия от соотношения пропана и кислорода в смеси были проведены опыты для различных случаев в интервале 1:7-1:2 (пропан: кислород). Пик давления достигал максимума при соотношении пропан: кислород 1:3-1:5.

В результате проведенных исследований авторы пришли к выводу, что метод газовой детонации по сравнению с другими методами уплотнения грунта более эффективен и безопасен.

В настоящее время существует несколько

временных инструкций [51, 52, 53] для расчета параметров зарядов в водонасыщенных грунтах при мелкомасштабных взрывах. Авторы работы [54] показывают, что для водонасыщенных грунтов величина заряда рассчитывается так же, как и для сухих, при этом отмечается специфика размещения заряда относительно уровня грунтовых вод. Более избирателен подход к расчету зарядов в методике [51], в которой даны рекомендации по расчету взрывных параметров на болотах для сооружения каналов и траншей методом сосредоточенных удлиненных горизонтальных и скважинных зарядов выброса. Данная методика предназначена для расчета взрывных параметров при сооружении каналов глубиной до 5м и шириной до 20м и траншей глубиной до 2-2,5м и шириной до 8м в торфе мощностью 0,5-5,0м при уровне грунтовых вод до 0,8м ниже поверхности болота.

Особая технология взрывных работ в водонасыщенных грунтах, использующая повторное взрывание, описана в работе [55]. В последние годы в практике строительства широко применяется способ форсированного уплотнения просадочных грунтов взрывом.

Метод уплотнения просадочных грунтов, разработанный в САНИРИ [56], основан на взрыве заряда в слое воды, покрывающем поверхность просадочной толщи. Грунтовый массив перед уплотнением взрывом увлажняется в течение 20 дней до степени водонасыщения. Установлено, что действие взрыва распространяется на глубину до 7м,

при этом плотность грунта возрастает на 11-12 %, коэффициент грунта уменьшается в 13-14 раз.

В работе [57] разработан метод глубинного уплотнения просадочных грунтов предварительным замачиванием с использованием энергии взрыва. При таком способе уплотнения просадочных грунтов можно производить работу на глубину 10-30м.

Технология предусматривает взрывание сетки камуфлетных точечных зарядов, расположенных в вертикальных скважинах на глубине, составляющей 65-70% толщи просадочных грунтов, в массиве грунта, предварительно замоченном через дренажные скважины до полного водонасыщения. Замачивание участка позволяет уплотнять грунт в десятки раз быстрее, чем обычном способе уплотнения. Кроме того, грунт уплотняется более равномерно по всей глубине и степень уплотнения повышается в несколько раз по сравнению с обычным способом. Однако параметры сетки расположения скважин и величины зарядов устанавливались опытным путем, без исследования напряженно-деформированного состояния грунтового массива при взрыве.

Анализ литературных данных свидетельствует о том, что вопросы форсированного улучшения строительных свойств просадочных грунтов решаются в настоящее время привлечением двух способов: глубинного уплотнения подземными взрывами сосредоточенных зарядов [58-60] и уплотнения подводными взрывами подвешенных в толще воды зарядов [56]. Опубликованные в печати методические материалы представляют собой

обобщение опыта взрывания по упомянутым схемам применительно к конкретным геологическим районам.

НИИСК Госстроя СССР разработал «Рекомендации по проектированию и производству работ ускоренным уплотнением просадочных лессовых грунтов большой мощности предварительным замачиванием и глубинными взрывами» [61].

В работе [62] обобщены результаты экспериментальных исследований, выполненных на различных строительных площадках Таджикской ССР. Применяя различные варианты размещения зарядов, авторы эмпирическим путем устанавливали оптимальные параметры их заложения для конкретных грунтовых условий. Масса единицы рекомендуемых зарядов при подводном взрывании 1кг при сетке 1x1 м. Рекомендуются также двухслойный и комби-нированный методы уплотнения грунтов. Первый заключается в уплотнении подводным взрывом естественного основания, перекрываемого затем слоем насыпного грунта мощностью 1-2м, который уплотняется повторным подводным взрывом. Второй способ заключается в уплотнении грунтового массива глубинными взрывами зарядов, а затем или одновременно - подводными взрывами зарядов, расположенных на поверхности массива. Очевидно, именно комбинированный метод заслуживает внимания, поскольку он позволяет обработать равномерно всю толщу просаждаемого грунта, если учесть, что

поверхностные взрывы при мощности просадочной толщи до 30м позволяют обработать лишь слой толщиной до 7м, а глубинные взрывы сосредоточенных зарядов практически не дают эффекта на поверхности массива. Однако комбинированный метод практически не отработан и требует широких теоретических и экспериментальных исследований характера распределения напряжений при взрыве, механизма взаимодействия отдельных фронтов взрывных вод в массиве, процессов образования под действием динамических нагрузок полей деформаций.

Первые попытки в этом направлении сделаны в Институте геофизики им. С.И. Субботина АН УССР [63, 64]. При выборе параметров взрывания учтена влажность - один из самых важных показателей, определяющих зону влияния взрыва. Так, для лессовых грунтов увеличение влажности с 5 до 18% вызывает прирост плотности при взрыве на 8-13%. Дальнейшее повышение влажности приводит к уменьшению размеров полостей и снижению абсолютных значений прироста плотности. В то же время в пределах деформированных взрывом зон изменяются прочностные характеристики (сцепление и угол внутреннего трения).

Размеры деформированной зоны с уменьшением величины сцепления значительны - порядка 40-50 радиусов сосредоточенного заряда. С повышением влажности грунт приходит в неустойчивое состояние, что имеет отрицательный эффект. Поэтому целесообразно производить взрывы в

грунтовым массиве при оптимальной влажности. Для каждого грунта она зависит от давления на грунт.

Наиболее характерными типами водонасыщенных грунтов, вовлекаемых в сферу практической деятельности при взрывных технологиях земляных работ, являются минеральные высокопористые (лессы, пески и супеси) и органоминеральные (торфы, сапропели) грунты. Исследования параметров взрывных волн напряжений до настоящего времени проведены главным образом в водонасыщенных минеральных грунтах (пески, супеси) [65]. Изучались закономерности формирования полей деформаций и напряжений в органоминеральных водонасыщенных грунтах. Эксперименты проводились на залежах торфа и сапропеля в условиях естественного залегания.

Основными факторами, влияющими на формирование полей напряжений и деформации под действием взрывной нагрузки, являются плотность, объемная и свободная пористость, степень водонасыщенности и процент содержания газообразной фазы в водонасыщенном грунте.

При распространении в среде возмущений от взрывных нагрузок в виде волн напряжений образуются области, в которых среда находится в напряженно-деформированном состоянии, а частицы ее - в движении. При этом вначале идет процесс нагрузки, а затем процесс разгрузки, которые, в свою очередь, характеризуются соответствующими параметрами напряжений и деформаций.

Большое влияние на процесс расширения полости оказывают свойства как водонасыщенного массива, так и ВВ. Инерция среды, свойства продуктов взрыва и физико-механические характеристики среды приводят к качественно различным процессам деформирования среды. Существенное влияние на прочностные показатели оказывает скорость деформирования [66]. Медленное или быстрое деформирование изменяет соотношение процессов разрушения и восстановления естественной структуры грунта, а также освобождения или отжатия грунтовых вод.

На формирование полей напряжений и деформаций в органоминеральных водонасыщенных массивах оказывают влияние физико-механические свойства грунтов, слагающих их [67].

Г.М. Ляхов [68] впервые показал, что параметром, определяющим интенсивность взрывных волн напряжений и уровень деформаций в водонасыщенных грунтах, является свободная пористость. Свои выводы Г.М.Ляхов сформулировал на основании большого количества экспериментальных данных, полученных при использовании минеральных водонасыщенных грунтов (песка, глины, лесса) с различным содержанием воздуха. Ранее были проведены работы по исследованию влияния величины свободной пористости на параметры волн напряжений в минеральных грунтах типа супеси [69].

Разработка теоретических вопросов деформирования дисперсных грунтов основывается

на использовании механических моделей, учитывающих основные свойства и поведение грунтов при различных режимах нагружения. В настоящее время предложено большое количество идеализированных математических моделей грунтов, отражающих в зависимости от конкретных требований определенные их реальные свойства и имеющих ряд частных решений.

Теоретическому исследованию закономерностей распространения волн напряжений в сжимаемых грунтах посвящен ряд работ [70-77]. Математическая модель среды в этих работах претерпевает изменения от линейно-упругой и линейно-неупругой до упругопластической и вязкопластической.

В связи с необходимостью получения исходных данных для построения математической модели грунта проведены исследования распространения волн напряжений в связных грунтах [5, 59, 78-81].

При исследовании параметров зоны влияния взрыва достаточно больших масштабов в грунтовом массиве ненарушенного строения наблюдается ряд аномалий в распределении плотности грунта, необъяснимый с позиции динамики сплошной среды [35, 64, 82, 83]. Эти аномалии в основном выражаются в неравномерном распределении плотности и влажности грунта в деформированной взрывом зоне, т.е. в зональном уплотнении грунта, и особенно явно проявляются в грунтах со слабыми структурными связями.

Наблюдаемые явления трудно объяснить с позиции современных представлений о механизме

действия взрыва в грунте под действием волны напряжений. Недостаточная изученность закономерностей деформирования грунтового массива делает невозможным применение традиционных технологий с использованием энергии взрыва.

В работах [84,85] приведены результаты лабораторных и полевых испытаний по уплотнению связных грунтов при действии газозрывной нагрузки. На основании проведенных исследований разработан новый метод, позволяющий с достаточной точностью определять плотность скелета грунта в широком диапазоне уплотняющих воздействий. Определены зоны деформаций, которые развиваются в массиве грунта вокруг эпицентра взрыва. Данный метод является более экономичным и безопасным по сравнению с другими традиционными методами уплотнения связных грунтов.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ ПРИ ВЗРЫВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

2.1 Особенности действия взрывных нагрузок в грунтах

При взрывах в грунтах волна детонации, выходя на поверхность заряда, преобразуется в интенсивную волну давления и расходящееся движение среды. График изменения давления или напряжений в среде вблизи места взрыва имеет форму разрыва, за которым следует постепенное затухание давления, т.е. наблюдается скачкообразное возрастание напряжений и, как следствие этому - возрастание плотности и скорости движения среды. Образующаяся вблизи от заряда взрывная волна с крутым фронтом называется ударной волной. В пределах действия ударной волны наряду с упругими деформациями наблюдаются интенсивное разрушение и значительные необратимые деформации грунта.

По мере распространения ударной волны величина скачка напряжений на ее фронте уменьшается, одновременно происходит расширение профиля волны и уменьшение крутизны фронта, т.е. превращение ее в непрерывную волну сжатия. Постепенно, по мере удаления от места взрыва, волна из ударной переходит в сейсмическую. В зоне действия сейсмических волн большая часть деформаций грунта носит упругий характер. В пределах зоны практически только упругих деформаций среды сейсмические волны становятся звуковыми.

При уплотнении грунтов взрывами основное изменение структуры грунта происходит в зоне действия преимущественно ударных волн. Накоплен значительный экспериментальный материал по исследованию параметров взрывных волн в воде и водонасыщенных грунтах. Результаты исследования параметров ударных волн в воде приведены в работах [86, 87], а в водонасыщенных грунтах – в работе [88].

Наиболее существенными параметрами взрывных волн являются максимальное давление, скорость распространения, время действия и импульс взрывной волны. Величина импульса взрывной волны:

$$J = \int_{t_1}^{t_2} p(t) \cdot dt, \quad (1)$$

где $p(t)$ - изменяющееся во времени давление взрывной волны.

Зависимости для определения параметров ударных волн, полученные экспериментальным путем [86] при взрыве сосредоточенных зарядов в воде, имеют вид:

$$P_{\max} = 53,3 \left(\sqrt[3]{\theta/R} \right)^{1,13}; J = 0,0059 \sqrt[3]{\theta} \left(\sqrt[3]{\theta/R} \right)^{0,89} \quad (2)$$

- где p_{\max} – максимальное давление, МПа;
- θ – масса заряда, кг;
- R- расстояние от центра взрыва, м;
- J- импульс, МПа·с.

Скорость распространения ударных волн вблизи заряда превышает скорость звука. По мере удаления от места взрыва скорость ударной волны в воде весьма быстро падает до своего предельного значения волны в воде, примерно равного скорости

звука (порядка 1500 м/с).

В водонасыщенных грунтах на параметры взрывных волн существенное влияние оказывает содержание газа. В общем случае водонасыщенный грунт представляет собой трехкомпонентную систему - твердые частицы, вода и газ. В водонасыщенных грунтах газ может содержаться в виде адсорбированного минеральной частью, растворенного в воде и свободного. Количество адсорбированного газа в грунтах невелико, вследствие чего он не оказывает заметного влияния на свойства грунта. Содержание растворенного газа сказывается на сжимаемости поровой воды. Основное влияние на физико-механические свойства водонасыщенных грунтов оказывает свободный газ, находящийся в грунте в виде отдельных пузырьков.

В настоящее время характерными типами водонасыщенных грунтов, вовлекаемых в сферу практической деятельности при взрывных работах, являются минеральные высокопористые (лессы, пески, супеси) и органоминеральные (торфы, сапропели) грунты. Исследования параметров взрывных волн напряжений до настоящего времени проведены главным образом в водонасыщенных минеральных грунтах (пески, супеси). Изучались закономерности формирования полей напряжений и деформаций в органоминеральных водонасыщенных грунтах. Основными факторами, влияющими на формирование полей напряжений и деформаций под действием взрывных нагрузок, являются плотность, общая и свободная пористость, степень водонасыщенности и процент содержания газообразной фазы в водонасыщенном грунте.

В момент выхода детонационной волны на поверхность заряда, где окружающая среда находится в покое, на поверхности зарядной полости производится удар, в результате которого в грунтовой среде начинают распространяться волны напряжений. При распространении в грунтовой среде возмущений от взрывных нагрузок в виде волн напряжений образуются области, в которых среда находится в напряженно-деформированном состоянии, а частицы ее - в движении. При этом вначале идет процесс нагрузки, а затем процесс разгрузки, которые, в свою очередь, характеризуются соответствующими параметрами напряжений и деформаций.

Энергия волны излучается в среду за очень короткий промежуток времени, пополнение ее происходит за счет уменьшения энергии продуктов взрыва, связанного с увеличением их объема, что приводит к расширению полости, т.е. деформации массива. Большое влияние на процесс расширения полости оказывают свойства как водонасыщенного массива, так и нагрузки. Инерция среды, свойства продуктов и физико-механические характеристики среды приводят к качественно различным процессам расширения полости деформирования среды. Существенное влияние на прочностные показатели оказывает скорость деформирования. Медленное или быстрое деформирование изменяет соотношение процессов разрушения и восстановления естественной структуры грунтов, а также освобождения или отжатия грунтовых вод.

По результатам многочисленных опытов установлено, что при содержании газа в водонасыщенных песках менее 1% взрывная волна

на всех исследованных расстояниях от места взрыва является ударной. При подходе фронта волны давление скачком возрастает до максимального значения $p_{\text{тах}}$, а затем так же, как и в воде, убывает по закону, близкому к экспоненциальному.

В водонасыщенном грунте с большим содержанием газа на близких расстояниях от центра взрыва волна является также ударной, но на некотором расстоянии давление уменьшается постепенно. После достижения максимального значения давления спад его происходит значительно медленнее, чем в грунте с малым содержанием газа. Таким образом, с увеличением содержания газа в водонасыщенном грунте время действия волны значительно возрастает, и кривая изменения давления имеет более плавный, неударный характер. Особенно четко это проявляется в неводонасыщенных грунтах.

Увеличение содержания газа в водонасыщенных грунтах оказывает влияние на скорость распространения фронта и величину давления на фронте. С увеличением содержания газа в водонасыщенных грунтах до 4% наблюдалось уменьшение скорости фронта волны (до 200 м/с). В полностью водонасыщенных песках скорость фронта волны, достигавшая 1600 м/с, близка к скорости распространения ударной волны в воде.

Сравнительно небольшое увеличение содержания газа в грунте вызывает значительное уменьшение максимальных давлений взрывной волны. При содержании газа в водонасыщенном песке около 4% максимальное давление на одинаковых расстояниях от места взрыва в 50-70 раз меньше, чем в полностью водонасыщенном песке. Еще более резкое снижение

давлений наблюдается в неводонасыщенных песчаных грунтах.

При прохождении взрывных волн наблюдается сжатие среды, зависящее от параметров взрывных волн, которые, в свою очередь, в значительной мере зависят от сжимаемости среды. Такое взаимное влияние определяет сложный характер воздействия взрывных волн на окружающую среду.

Сжимаемость воды относительно невелика, при обычных температурах (0-20°C) и давлении до нескольких сот атмосфер ее модуль объемной сжимаемости составляет 2000 МПа. Взрывные волны в воде имеют ударный характер и вследствие ее малой сжимаемости слабо затухают с изменением расстояния. Благодаря большой однородности масс воды и незначительному изменению ее свойств при обычных температурах и давлениях параметры взрывных волн в воде не меняются при одинаковых относительных расстояниях от заряда. Они легко воспроизводимы в экспериментах и производственных условиях.

В отличие от воды грунтовая среда весьма неоднородна и разнообразна. Сжимаемость грунтов меняется в весьма широких пределах, поэтому характер взрывных воздействий в них так же многообразен. Основной особенностью грунтов является их многокомпонентность. Все это обуславливает значительные трудности при экспериментальных исследованиях и, в особенности, при попытке оценить действие взрыва расчетным путем.

Приведенные выше сведения о действии взрыва в воде и почти полностью водонасыщенных несвязных грунтах показывают, что характер

взрывных волн в этих средах практически совпадает, а параметры волн близки по величине. Действие взрыва в неводонасыщенных грунтах качественно отличается от действия в воде и водонасыщенных несвязных грунтах, а интенсивность динамических воздействий в воде и водонасыщенных грунтах значительно больше, чем в неводонасыщенных. Все это приводит к тому, что характер разрушения структуры и уплотнения водонасыщенных несвязных грунтов отличается от аналогичных процессов в неводонасыщенных грунтах. С увеличением содержания в водонасыщенных грунтах газовой составляющей это различие несколько уменьшается.

На интенсивность взрывных волн и напряженное состояние среды влияют свойства граничных поверхностей. Так, например, при взрыве в воде или грунте подход взрывной волны к границе с воздухом, имеющим малое сопротивление, обуславливает возрастание скорости движения грунта и воды. В случае близкого расположения заряда к поверхности возможно преодоление сил тяжести и сил взаимодействия между частицами среды, что приводит к выбросу воды или грунта и созданию воронки в грунтах. Если прорыв газов взрыва в атмосферу при выбросе происходит до максимального развития давлений в газовой полости, взрывная волна в грунте или воде не успевает полностью сформироваться. Поэтому уменьшение глубины заложения заряда и образование интенсивного выброса обуславливают уменьшение параметров взрывных волн. Так, например, камуфлетный взрыв в водонасыщенном грунте или воде приводит к тому, что около 75 % энергии взрыва выделяется в виде полезной механической

энергии ударной волны и газового пузыря.

При встрече распространяющейся в воде или грунте взрывной волны с границей более плотной и менее сжимаемой среды, например, с дном водоема или подстилающим, более плотным, в частности скальным, грунтом, взрывная волна отражается в виде волны сжатия, причем в результате сложения падающей и отраженной волн давление увеличивается.

Таким образом, действие взрыва на грунт весьма многообразно и характеризуется сложным комплексом действующих одновременно или с некоторой последовательностью динамических силовых факторов. Эти факторы могут в определенных условиях вызывать разрушение структуры, которое сопровождается уплотнением грунтов, либо обуславливает разрыхление и даже нарушение их сплошности. Для оценки области и условий применимости при производственном качественном уплотнении связных и несвязных грунтов в первую очередь необходимо рассмотреть особенности их структуры, деформативность и прочность грунтов, процессы их разрушения и уплотнения от действия динамических нагрузок.

2.2 Особенности структуры несвязных и связных грунтов

Свойства грунтов в значительной мере определяются их структурой. Под структурой несвязных грунтов обычно понимается расположение частиц различной крупности и формы, их взаимодействие и характер связей между ними.

Несвязные грунты представляют собой систему

сравнительно крупных минеральных частиц или обломков горных пород, образующих жесткий скелет с непосредственными контактами между твердыми частицами грунта. Особенностью несвязных грунтов является отсутствие или малая прочность между частицами.

Прочностные, деформационные и фильтрационные свойства несвязных грунтов в основном определяются их гранулометрическим составом, формой частиц и плотностью сложения. С увеличением крупности частиц несвязных грунтов, как правило, увеличиваются их прочность и водонепроницаемость, уменьшается сжимаемость при статических нагрузках.

На свойства несвязных грунтов оказывает влияние форма и характер поверхности их частиц. Форма частиц в зависимости от истории их образования в природных условиях может меняться в широких пределах: от очень окатанных, гладких частиц, близких по форме к шару, до неокатанных, угловатых, пластинчатой или даже игольчатой формы.

Взаимное расположение частиц несвязных грунтов в некоторой мере характеризует величина их коэффициентов пористости (отношение объема пор к объему твердых частиц). Возможный диапазон их изменения оценивается по характерным (предельным) значениям (коэффициентам пористости в максимально рыхлом e_{\max} и максимально плотном e_{\min} состояниях).

Различные по гранулометрическому составу грунты имеют различные величины e_{\max} и e_{\min} , причем с увеличением крупности они уменьшаются. Не меньшее влияние на предельные значения

коэффициентов пористости оказывает форма частиц: с увеличением окатанности и сферичности она уменьшается. Таким образом, все это убедительно показывает, что коэффициент пористости или пористость не могут приниматься в качестве характеристик плотности сложения несвязных грунтов. Тем более в качестве характеристики плотности сложения не может приниматься плотность (объемная масса) скелета грунта, которая дополнительно зависит от плотности самих частиц.

Основной характеристикой плотности сложения несвязных грунтов следует считать степень плотности сложения или коэффициент относительной плотности сложения I_D .

Величина относительной плотности меняется от нуля в самом рыхлом состоянии до единицы в самом плотном состоянии. Чем меньше величина I_D , тем больше потенциальная возможность уплотнения несвязного грунта. Таким образом, при оценке плотности сложения песков по величине I_D , кроме гранулометрического состава, косвенным образом учитываются форма частиц, шероховатость их поверхности и другие их морфологические особенности.

Существенно влияние формы частиц и, как следствие, конфигурации грунта на его водопроницаемость. С уменьшением окатанности частиц сопротивление движению воды в порах возрастает.

Еще больше влияние формы частиц на прочностные свойства несвязных грунтов, определяемые величиной угла внутреннего трения φ . С увеличением окатанности и сферичности угол внутреннего трения грунта уменьшается.

Следует отметить, что меньший коэффициент пористости или большая объемная масса несвязного грунта не могут быть единственным основанием для оценки его как более прочного. В ряде случаев большая пористость, как следствие малой окатанности частиц, может быть признаком большей прочности грунта.

Вследствие жесткости скелета даже рыхлые несвязные грунты при действии статических сжимающих нагрузок мало уплотняются. Уменьшение пористости несвязных грунтов при статическом сжатии происходит вследствие деформаций на контактах малосжимаемых минеральных частиц или в результате их взаимного проскальзывания, а также вследствие разрушения отдельных частиц их углов и взаимного смещения частиц.

Необходимым условием существенного уплотнения несвязных грунтов является разрушение их структуры. Разрушением структуры несвязных грунтов будем называть взаимное смещение частиц грунта, сопровождаемое изменением расположения точек и поверхностей контактов между частицами. Связи между частицами при разрушении структуры частично или полностью нарушаются. Разрушение структуры всегда сопровождается объемными деформациями несвязного грунта.

Отличительной особенностью лессовидных и глинистых грунтов является сложное минерально-дисперсное строение, являющееся результатом процессов внешней динамики земли. К их числу относятся выветривание, перенос продуктов разрушений водой и ветром, аккумуляция осадков в различных физико-географических средах и т.п. В

условиях естественного залегания лессовидные и глинистые породы представляют сложнейшую гетерогенную систему взаимодействующих между собой частиц твердого минерального скелета, различных видов содержащейся в порах грунтов воды, ее паров и газов. Физико-механические свойства этих грунтов в значительной мере определяются химическим и минералогическим составом частиц, величиной и характером пористости, количественным соотношением между твердой, жидкой и газообразной средами.

Лессовидные и глинистые грунты состоят не только из песчаных и пылеватых частиц, но и продуктов их выветривания - глинистых фракций размером менее 0,005мм. Большую роль в скоплении частиц минерального скелета и их агрегатов играют коллоидные фракции, имеющие размеры менее 0,001мм. Именно глинистые, в том числе и коллоидальные частицы во взаимодействии с поровой влагой создают особые свойства связных грунтов, их низкую водо- и газопроницаемость, липкость, набухание, усадку, развитие внутренних сил сцепления и др.

Минералогический и химический составы, количественное содержание в грунтах глинистых частиц, пористость и влажность грунтов определяют, в свою очередь, характер уплотнения в процессе динамического приложения нагрузки. Механическую прочность грунтов, т.е. способность сопротивляться деформациям, возникающим под действием внешних сил, обуславливают силы связности, природа которых в современном представлении многообразна и сложна. Причем прочность мягких пород зависит лишь от

прочности связей между частицами, поскольку прочность частиц всегда больше прочности связей между ними.

Характер структурных связей между частицами определяется первичным накоплением твердого вещества и последующим его изменением в процессе литогенеза. Структурные связи подразделяются на коагуляционные, аморфные и кристаллические. Первые по своей природе молекулярные. Их прочность невелика и определяется толщиной водных оболочек между частицами, т.е. влажностью глинистых грунтов. Им свойственна обратимость, разрушение и отсутствие жесткости.

Аморфные связи - молекулярные, необратимые, водостойкие и жесткие. Прочность их высока.

Кристаллизационные связи - ионные, необратимые и жесткие. Их прочность определяется условиями образования кристаллов и при известных условиях может падать. Прочность высока, особенно если кристаллы возникли в результате срастания друг с другом. Связи могут быть водостойкими и неводостойкими в зависимости от того, за счет какого химического вещества они образованы.

Прямых способов определения структурных связей в глинистых грунтах нет. Они могут быть определены лишь косвенно - путем просмотра шлифов, на основании анализа результатов вытяжек и данных кинетики тиксотропного упрочнения. Как правило, в глинистых грунтах отмечаются одновременно смешанные связи, количественные соотношения которых изменяются во времени.

Любое механическое воздействие на грунты приводит к видоизменению и нарушению указанных связей, причем характер приложенной нагрузки

будет диктовать определяющее значение какого-либо вида связей в формировании конечной общей величины связности данного грунта.

В частности, при воздействии на массив грунта знакопеременной нагрузки (например, вибрации) в первую очередь будут нарушаться коагуляционные связи, которые при прекращении воздействия восстанавливаются, в большей или меньшей степени приближаясь к первоначальным значениям.

При приложении к грунтовому массиву нагрузок, вызывающих его деформации, следует ожидать нарушение всех видов связности. В данном случае общая величина прочности будет зависеть от величины деформации, при возрастании которой происходит нарушение всех описанных видов связности и соответственное снижение прочности грунтов.

Однако при сближении частиц грунта увеличиваются межмолекулярные силы взаимодействия между частицами, которые становятся тем значительнее, чем больше непосредственных точек контакта между частицами.

Деформация грунта предопределяет изменение соотношения фаз, что создает предпосылки для трансформации видов связности и появления новых очагов кристаллизации. В связи с этим большое значение имеет минеральный состав глинистых частиц, в зависимости от вида которого последние способны быстрее или медленнее отдавать связанную воду. Глинистые минералы объединяют в три группы: монтмориллонит, каолинит и гидрослюды. Первый в наибольшей степени способен впитывать и с трудом отдавать воду; второй наименее предрасположен к набуханию; третьи занимают промежуточное

положение. Глинистые грунты, частицы которых состоят из монтмориллонита, наиболее предрасположены к тиксотропным превращениям.

В уплотненной взрывом зоне деформация грунтов неравномерна по объему: она максимальна у границ газовой полости с последующим уменьшением в периферийной области. Кроме того, генерируемая взрывом волна напряжений, вырождаясь на границе зоны уплотнения в упругую, распространяется на значительные расстояния, в свою очередь вызывая изменение структурных связей в глинистых грунтах - временное разрушение коагуляционных связей.

При исследовании связных грунтов, представленных суглинками и глинами с высоким содержанием глинистых частиц, подверженных импульсным нагрузкам в различных уплотненных зонах, в которых деформации характеризуются различными величинами, возможные изменения в них со временем следует объяснить физико-химическими и физическими процессами, среди которых существенную роль играют тиксотропные изменения. Они происходят в зоне деформаций, где глинистый грунт испытывает тиксотропное разупрочнение, сопровождающееся разрушением структурных связей, освобождением от воды и переходом связанной воды в свободную. Со временем наблюдается обратный процесс - трансформация свободной воды в физически связанную с одновременным протеканием иммобилизации свободной воды. Указанные факторы вместе с межчастичным взаимодействием создают необходимые условия для восстановления структурных связей в грунте.

2.3 Упруговязкопластические деформации грунтов при статических и динамических нагрузках

Грунт представляет собой трехкомпонентную среду, состоящую из твердых частиц, воды и воздуха. Твердые частицы образуют скелет грунта, а вода и воздух заполняют промежутки между зернами грунта. При воздействии нагрузок вода и воздух выжимаются из пор грунта, вследствие чего меняются и механические свойства грунтов. Большое влияние при этом имеет продолжительность воздействия нагрузок.

При длительных статических нагрузках вода и воздух почти полностью выжимаются из пор, вследствие чего состав грунта меняется; при кратковременных динамических нагрузках вода и воздух отжимаются из пор не полностью, вследствие чего состав грунта меняется в меньшей степени.

При разработке методов расчета сооружений исходят из классических гипотез о работе материала конструкций и грунта. В основу упругой стадии работы положена линейная зависимость между напряжениями и деформациями. Для пластической стадии характерна нелинейная зависимость между напряжениями и деформациями, закон которой устанавливается на основании теоретических или экспериментальных данных. В ряде случаев нелинейную зависимость можно линеаризировать. Работа грунта для обеих стадий рассматривается независимо от времени воздействия нагрузки. Подобные предпосылки достаточно удовлетворительно соответствуют работе сооружений при воздействии длительных

статических нагрузок.

Однако при динамических процессах, характеризующихся воздействием на сооружение кратковременных и мгновенных сил, рассмотренные предпосылки обеспечивают удовлетворительную сходимость расчетных и экспериментальных данных не всегда. Особенно значительно различие при сильных кратковременных динамических нагрузках (удары, взрывы, импульсы большой силы).

Грунтовое основание в условиях воздействия мгновенных и кратковременных сил целесообразно рассматривать как упруговязкую и пластическую среду. Наличие упругой и вязкой составляющей среды для такой модели позволяет развитие деформаций во времени с учетом реальных реологических свойств грунта.

Упруговязкие деформации характеризуются тем, что при разгрузке они полностью восстанавливаются. При этом мгновенно восстанавливающиеся деформации носят название упругомгновенных (истинно упругие), компоненты тензора которых обозначаются ε_{ij}^e . Деформации, восстанавливающиеся во времени, называются упруговязкими ε_{ij}^{ev} . Упругие деформации связаны с напряжением σ_{ij} законом Гука:

$$\varepsilon_{ij}^e = c_{ij} \cdot \sigma_{ij} \quad (3)$$

Остановимся на изотропном материале, характеризуемом всего двумя механическими константами:

$$\sigma_{ij} = 2 \cdot \mu \cdot \varepsilon_{ij}^e + \delta_{ij} \cdot \lambda \cdot \varepsilon_{ij}^e \quad (4)$$

где μ и λ - постоянные Ламе.

Между постоянными Ламе, модулем продольной упругости E , коэффициентом Пуассона ν , модулем сдвига G и модулем всестороннего сжатия K имеют место следующие соотношения:

$$\lambda = \frac{\nu \cdot E}{(1+\nu)(1-2\nu)}; \mu = G = \frac{E}{2(1+\nu)}; K = \frac{E}{3(1-2\nu)}; -1 \leq \nu \leq 1/2. \quad (5)$$

Таким образом, упругое поведение изотропного грунта характеризуется двумя константами: G^e и K^e .

Для определения модулей упругости грунта иногда используется статическая разгрузка образцов и по восстанавливающейся части деформации вычисляются статические модули упругости G_{oo}^e и K_{oo}^e .

Следует отметить, что в восстанавливающееся значение деформации входит и доля «запаздывающих» деформаций. Истинно мгновенные модули упругости следует определять по скоростям распространения в грунте упругих волн. Такие модули иногда называют динамическими модулями упругости и G_o^e и K_o^e . Они, как правило, превышают статические модули упругости в 2-5 раз. Такая разница в значениях упругих констант объясняется тем, что на развитие упругих деформаций в грунте оказывает влияние внутреннее трение.

Наиболее простая формулировка соотношений, определяющих вязкие деформации грунтовых материалов, следует из предположения, что скорость вязких деформаций пропорциональна разности между действующими напряжениями и деформациями, соответствующими упругим деформациям [89-90].

Суммарная скорость упруговязких деформаций складывается из скорости упругих деформаций и

скорости запаздывающих деформаций:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{e^g} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^g \quad (6)$$

Статические модули упругости определяются по диаграммам $\sigma_i - \varepsilon_i$. Для построения указанных диаграмм следует на различных режимах, реализуемых в приборах трехосного сжатия, напряженно-деформированного состояния образца производить разгрузку. По разгрузке упругая составляющая деформаций находится как разность между полной стабилизированной деформацией, соответствующей напряженному состоянию образца грунта, с которого начинается разгрузка, и остаточной деформацией.

Динамические характеристики упругости грунта могут быть определены по скорости распространения упругих колебаний в грунте. Для упруговязкой среды, характеризуемой соотношением (6), существует достаточно сложная зависимость между скоростью распространения колебаний, реологическими параметрами среды и длиной волны. Только при очень быстрых колебательных процессах реологические свойства не успевают сказаться на скорости распространения упругих волн.

При этом существенным является тот факт, что эти грунты находятся в условиях сложного статического напряженного состояния, которое, очевидно, значительным образом сказывается на упругих характеристиках этих грунтов.

На рисунке 13 представлены графики изменения скорости продольной волны C_p в зависимости от объемных деформаций ε_g для случаев, когда

приложение возрастающего девиатора напряжения приводит к разрушению материала. Опыты проводились по единой схеме: сначала ступенями прикладывалось гидростатическое обжатие, а затем при постоянном боковом давлении ступенями повышалась осевая сжимающая нагрузка [91].

На этапе нагружения в допредельном состоянии прирост скорости продольных, упругих волн C_p в грунтах пропорционален их объемной деформации и не зависит от траектории и режима нагружения:

$$\Delta C_p = C_p^o - C_p = A \cdot \varepsilon_g \quad (7)$$

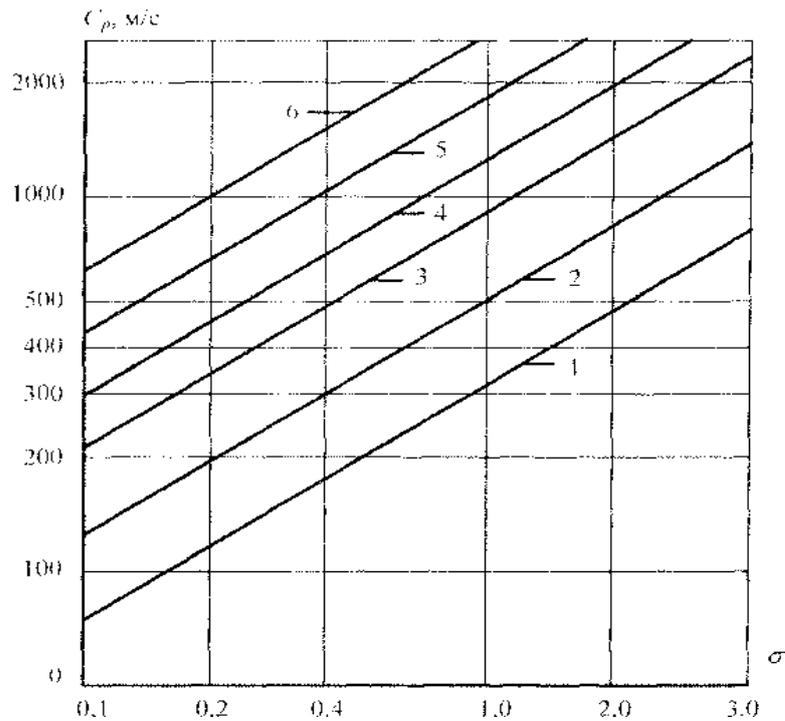
При разгрузке, т.е. при уменьшении напряжения, происходят только упругие деформации, не сопровождающиеся перекомпоновкой частиц и изменением числа контактов между ними. В этом случае (6) приобретает вид:

$$|\Delta C_p| = B \cdot (\Delta \sigma)^\alpha, \quad (8)$$

где $\Delta \sigma$ - степень уменьшения суммы главных напряжений;

B - параметр, зависящий при прочих равных условиях от начальной плотности сложения грунта.

Приведенные на рисунке 13 экспериментальные данные по скоростям упругих волн на этапе разгрузки подтверждают соответствие их степенной зависимости вида (8). Из графиков следует, что параметр B действительно уменьшается с ростом начальной плотности $\rho_{СК}$, а показатель степени α , равный угловому коэффициенту прямых, составляет приблизительно 0,65.



1 - гранит; 2 - песок мелкозернистый; 3 - песок крупнозернистый; 4 - плотный гравелистый грунт; 5 - маловлажный суглинок; 6 - влажная глина

Рисунок 13. Зависимость скорости упругих волн C_p от среднего напряжения σ при разгрузке

Скорость распространения упругих продольных волн в массиве грунта равна:

$$C_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2 \cdot \mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \nu)}{g(1 + \nu)(1 - 2 \cdot \nu)}}, \quad (9)$$

где ρ - плотность грунта; g - ускорение свободного падения.

Приведенные скорости распространения упругих волн являются основными механическими характеристиками динамических свойств грунта. С помощью формул (5) и (9) можно определить модуль упругости E и коэффициент Пуассона ν грунта по экспериментально полученным скоростям

распространения волн и далее по известным формулам вычислить коэффициенты жесткости, входящие в формулы расчета сооружений, заглубленных в грунт.

Деформирование грунтов в процессе нагружения сопровождается накоплением пластических деформаций, которые при разгрузке не восстанавливаются. Закономерности развития пластических деформаций, изучение условий разгрузки грунта - все эти вопросы являются определяющими при формулировке математической модели грунта, от которой в конечном итоге зависят результаты расчета грунтовых сооружений.

Модуль объемной деформации грунта K^p пластический определяется из выражения согласно [92]:

$$K^p = \frac{a - b \cdot \sigma}{1 - c \cdot \sigma} + \frac{n}{1 - m \cdot \sigma} \quad (10)$$

Параметры зависимости (10), в свою очередь, являются некоторыми функциями интенсивности деформаций e_i . Функция вида (10) в общем случае отражает как процесс доуплотнения, так и процесс разрыхления грунта. Развитие этих процессов, в свою очередь, зависит от значений σ и e_i .

Следует также учесть, что при $\sigma \rightarrow \infty$ модуль объемного деформирования стремится к значению упругого модуля, т.е. при $\sigma \rightarrow \infty$ модуль $K^p \rightarrow K_\infty^0$ и поэтому в (10) следует считать $b/c = K_\infty^0 = const$.

Для ограниченного диапазона изменения давления $\sigma > 0$, как показывают эксперименты, можно принять $c=0$ и $n=0$ и тогда функция (10) принимает линейный вид:

$$K^p = \alpha(e_i) - b(e_i) \cdot \sigma, \quad (11)$$

при этом параметр α с увеличением e_i , как правило, увеличивается, значение параметра b либо уменьшается монотонно, либо уменьшается до некоторого значения.

Для определения пластического модуля сдвига G^p может быть принята зависимость [95]:

$$\sigma_i = \sigma_i^* \cdot \Phi(e_i), \quad (12)$$

где

$$\Phi(e_i) = e_i / (A + B \cdot e_i), \quad (13)$$

откуда легко определяется модуль сдвига:

$$G^p = \sigma_i^* \cdot \Phi(e_i) / e_i \quad (14)$$

Параметр A функции $\Phi(e_i)$ можно представить также в форме:

$$A = (1 - B) \cdot e_i^* \quad (15)$$

где e_i^* - предельная интенсивность деформаций сдвига.

Следует отметить, что при $e_i^* \rightarrow \infty$ параметр $B=1$, $A=(1 - B) \cdot e_i^* = \text{const}$.

Функция прочности $\sigma_i(\sigma)$ согласно условию прочности [95]:

$$\sigma_i^* = c_{\text{окт}}^* - \sigma \cdot \text{tg} \varphi_{\text{окт}}^* \quad (16)$$

где $c_{\text{окт}}^*$, $\varphi_{\text{окт}}^*$ - сцепление и угол внутреннего трения грунта по октаэдрической площадке.

На основании обработки экспериментальных данных, приведенных в работах [93,94], по выражениям (7-16) были получены статические, пластические, динамические модули и постоянные Ламе для различных грунтов.

1. Мелкозернистый песок: $\rho_o^{\text{ск}} = 1,652 / \text{см}^3$; пористость $m=0,2$; $I_D=0$; $e_i=0,12$; $\varepsilon_9 = -0,035$; $A = 0,1$; $B = 0,8$; $\text{tg} \varphi_{\text{окт}}^* = 0,66$; $c_{\text{окт}}^* = 0,13$ МПа; $\alpha = (2 + 20e_i)$, МПа; $b = (10,5 - 6,25e_i)$; $\sigma_i^* = 2,5$ МПа; $C_p = 130$ м/с; $\nu = 0,3$; $G_\infty^e = 16$ МПа; $K_\infty^e = 20$ МПа; $G^p = 12$ МПа; $K^p = 14,4$ МПа;

$G_o^e=28,6\text{МПа}; K_o^e=74,3\text{МПа}; \lambda =43\text{МПа}; \mu = 28, 6\text{МПа}.$

2. Гравийно-галечниковая смесь: $\rho_o^{ck} = 2,30\text{г/см}^3$;
 $I_D = 0,7$; $e_i = 0,04$; $\varepsilon_9 = -0,025$; $A = 0,08$; $B = 0,983$;
 $\text{tg}\varphi_{\text{окт}}^* = 1,01$; $c_{\text{окт}}^* = 0,0864\text{МПа}$; $\alpha = 12 - 100/[14(1+100e_i)]$,
 МПа ; $b = 8,5 + 100/[15(1+600e_i)]$; $\sigma_i^* = 0,057 - 0,905\sigma$, МПа ;
 $C_p = 300 \text{ м/с}$; $\nu = 0,25$; $G_\infty^e = 25\text{МПа}$; $K_\infty^e = 25\text{МПа}$;

$G^p = 18,5 \text{ МПа}$; $K^p = 2 \text{ МПа}$; $G_o^e = 120\text{МПа}$; $K_o^e = 300\text{МПа}$;
 $\lambda = 120 \text{ МПа}$; $\mu = 120 \text{ МПа}.$

3. Супесь - материал ядра Нурекской ГЭС:
 $\rho_o^{ck} = 2,25 \text{ г/см}^3$; $I_D = 0,80$; $e_i = 0,12$; $\varepsilon_9 = 0,08$; $A = 0,14$;
 $B = 0,943$; $\text{tg}\varphi_{\text{окт}}^* = 0,636$; $c_{\text{окт}}^* = 0,109 \text{ МПа}$; $\alpha = 2,1 \text{ МПа}$;
 $b = 16,2 + 3,45/(1+86e_i)$; $\sigma_i^* = 0,12 - 0,7\sigma$, МПа ; $C_p = 360 \text{ м/с}$;

$G_\infty^e = 28\text{МПа}$; $K_\infty^e = 45\text{МПа}$;
 $\nu = 0,33$; $G^p = 20 \text{ МПа}$;
 $K^p = 26\text{МПа}$; $G_o^e = 124\text{МПа}$; $K_o^e = 330 \text{ МПа}$; $\lambda = 186\text{МПа}$;
 $\mu = 124 \text{ МПа}.$

4. Супесь нарушенной структуры: $\rho_o^{ck} = 1,62 \text{ г/см}^3$;
 $I_D = 0,7 - 0,9$; $e_i = 0,40$; $\varepsilon_9 = -0,21$; $A = 0,11$; $B = 0,823$;
 $\text{tg}\varphi_{\text{окт}}^* = 0,869$; $c_{\text{окт}}^* = 0,12\text{МПа}$; $\alpha = [90 + 1/(0,31 + 1,02e_i)] \times 0,022$, МПа ;
 $b = 0,9 + 1/(0,24 + 5,6 e_i)$; $C_p = 210 \text{ м/с}$;

$G_\infty^e = 15\text{МПа}$;
 $\nu = 0,27$; $K_\infty^e = 17\text{МПа}$; $G^p = 6,5 \text{ МПа}$;
 $K^p = 8,4\text{МПа}$; $G_o^e = 58\text{МПа}$; $K_o^e = 150\text{МПа}$; $\lambda = 69\text{МПа}$;
 $\mu = 58\text{МПа}.$

5. Суглинок лессовидный: $\rho_o^{ck} = 1,64 \text{ г/см}^3$; $m = 0,4$;
 $I_D = 0,7 - 0,9$; $e_i = 0,3$; $\varepsilon_9 = -0,15$; $A = 0,1$; $B = 0,7$; $\text{tg}\varphi_{\text{окт}}^* = 0,72$;
 $c_{\text{окт}}^* = 0,08 \text{ МПа}$; $\alpha = (5 + 115 e_i)$, МПа ; $b = (45 - 35 e_i)$;
 $\sigma_i^* = 0,04 - 0,7\sigma$, МПа ; $C_p = 495 \text{ м/с}$; $\nu = 0,32$;

$G_\infty^e = 38\text{МПа}$; $K_\infty^e = 56\text{МПа}$;
; $G^p = 29 \text{ МПа}$; $K^p = 42 \text{ МПа}$;
 $G_o^e = 200\text{МПа}$; $K_o^e = 400\text{МПа}$; $\lambda = 152 \text{ МПа}$; $\mu = 211 \text{ МПа}.$

2.4 Амплитудно-частотный спектр волн напряжений в грунте, генерируемых взрывным нагружением

Разработка теоретических вопросов динамического деформирования дисперсных грунтов основывается на использовании механических моделей, учитывающих основные свойства и поведение грунтов при различных режимах нагружения. В настоящее время предложено большое количество идеализированных математических моделей грунтов, отражающих в зависимости от конкретных требований определенные их реальные свойства и имеющих ряд частных решений.

Наряду с процессами, протекающими в грунте под действием волны напряжений и образования зоны остаточных деформаций, заметная роль принадлежит остаточным явлениям – фильтрационной консолидации, разупрочнению, тиксотропному упрочнению грунтового массива. Недостаточная изученность закономерностей определения параметров взрывной нагрузки при ведении взрывных работ в грунтах, особенно в сложных грунтовых условиях, в ряде случаев делает невозможным применение традиционных технологий с использованием энергии взрыва.

Разработка методов управления процессом деформирования дисперсных грунтов основывается, в первую очередь, на исследовании характерных параметров взрывного импульса - максимального значения напряженности и длительности затухания

импульса в реальных средах во взаимосвязи, разработке приемов направленного изменения соотношения между силовыми и временными характеристиками импульса.

В современной науке, в частности в гидродинамике, исследование механизма генерирования ударных волн и их взаимодействие со средой основывается на принципе автомодельности движения. Наиболее приемлем этот принцип применительно к практически идеальной среде - воде: закономерности движения анизотропных многокомпонентных сред (грунтов и горных пород) значительно сложнее в связи со спецификой взаимодействия слагающих их компонентов в движении с фронтом возмущений, взаимного их перемещения, резкого возрастания диссипативных потерь. Использование при изучении динамики грунтов принципа автомодельности, несмотря на определенную его условность, позволяет существенно упростить теоретическое описание процесса распространения взрывных волн в грунтах. Однако перенос аппарата этих задач на высокопористые грунты с высокой поглощающей способностью практически не дает возможности получить количественную картину распределения полей напряжений вокруг очага взрыва, поскольку в действительности ввиду размывания фронта ударной волны под влиянием объемной вязкости грунта происходит ее вырождение в волну сжатия, которая характеризуется в каждой точке массива двумя основными параметрами - максимальной

амплитудой напряжения, длительностью его нарастания и спада. Изменение определенным способом соотношения между указанными параметрами лежит в основе ряда приемов управления действия взрыва. Вместе с тем, оценка эффективности взрывного импульса по соотношению силовых и временных параметров не может быть достаточно полной, поскольку при этом физическая сущность явления взаимодействия напряжений со средой остается нераскрытой.

Более полно осветить взаимный процесс можно с помощью теории спектров. Амплитудно-частотный спектр волн напряжений, генерируемых взрывом, зависит от основных характеристик импульса и позволяет комплексно оценить его эффективность.

Поскольку размыв фронта взрывной волны особенно заметен в области малых напряжений (менее 3 МПа), т.е. на некотором удалении от очага взрыва, в области слабых воздействий, соизмеримых с сейсмическими, где отмечен ряд аномальных явлений зонального уплотнения грунта и образования зоны кольматации, исследование спектральных характеристик слабых волн напряжений правомерно осуществить в упругой постановке.

Рассмотрим действие цилиндрического источника колебаний с сейсмоизлучателем радиусом r_H в массиве грунта, упругие свойства которого определяются константами Ламе λ и μ и плотностью ρ . При действии на границе сейсмоизлучателя напряжения $p(t)=\sigma_r(t)$ движение массива описывается

волновым уравнением [95]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{2\partial u}{r \cdot \partial r} - \frac{2 \cdot u}{r^2} = \frac{1}{c_p^2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (17)$$

где u - радиальное перемещение упругой волны;
 C_p - скорость продольной волны.

Решение уравнения (17) ищем в виде:

$$u = \frac{\partial(f(\tau/2))}{\partial \tau} = -\frac{1}{r^2} - \frac{1}{r \cdot C_p} \cdot \frac{\partial f_i}{\partial \tau}, \quad (18)$$

где $\tau = t - (r - r_H)/C_p$;

f_i - неизвестная функция, которая определяется из граничного условия.

Радиальное напряжение:

$$\sigma_r(t) = \left[(\lambda + 2 \cdot \mu) \cdot \frac{\partial u}{\partial r} + 2\lambda \frac{u}{r} \right]_{r=r_H} \quad (19)$$

Находим:

$$\frac{\partial u}{\partial r} = \frac{1}{r \cdot C_p^2} \cdot \frac{\partial^2 f^2}{\partial \tau^2} + \frac{2}{r^2 \cdot C_p} \cdot \frac{\partial f_1}{\partial \tau} + \frac{2 \cdot f_1}{r^3}. \quad (20)$$

Подставляя (18) и (20) в (19), получим:

$$\sigma_r = \frac{\lambda + 2 \cdot \mu}{r_H \cdot C_p^2} \cdot f'' + \frac{4\mu}{r_H^2 \cdot C_p} \cdot f_1' + \frac{4\mu}{r_H^3} f_1. \quad (21)$$

Умножая (21) на $e^{-i\omega\tau}$ и интегрируя по ω , имеем:

$$\begin{aligned} S_\sigma(\omega) &= \frac{\lambda + 2 \cdot \mu}{r_H \cdot C_p^2} \cdot (i\omega)^2 \cdot S_f(\omega) + \frac{4\mu}{r_H^2 \cdot C_p} \cdot i\omega \cdot S_f(\omega) + \frac{4\mu}{r_H^3} \cdot S_f(\omega) \\ &= S_f(\omega) \cdot \left[\frac{4\mu}{r_H^3} + \frac{i\omega \cdot 4\mu}{r_H^2 \cdot C_p} - \frac{(\lambda + 2 \cdot \mu) \cdot \omega^2}{r_H \cdot C_p^2} \right] \end{aligned} \quad (22)$$

Комплексный спектр смещения находим по

формуле (18):

$$S_H(\omega) = -\frac{S_f}{r^2} - \frac{1}{r \cdot C_p} \cdot i\omega \cdot S_f = S_f \left(\frac{1}{r^2} + \frac{i\omega}{r \cdot C_p} \right), \quad (23)$$

отсюда:

$$S_f = S_H(\omega) / \left(\frac{1}{r^2} + \frac{i\omega}{r \cdot C_p} \right) \quad (24)$$

Подставляя формулу (24) в (22), получим:

$$S_\sigma(\omega) = \frac{S_H(\omega)}{\left(\frac{1}{r^2} + \frac{i\omega}{r \cdot C_p} \right)} \cdot \left[\frac{4\mu}{r_H^3} + \frac{i\omega \cdot 4\mu}{r_H^2 \cdot C_p} - \frac{(\lambda + 2\mu) \cdot \omega^2}{r_H \cdot C_p^2} \right] \quad (25)$$

Из выражения (25) определяем после несложных преобразований:

$$S_H(\omega) = S_\sigma(\omega) \frac{\left(\frac{1}{r^2} + \frac{i\omega}{r \cdot C_p} \right)}{\left[\frac{4\mu}{r_H^3} + \frac{i\omega \cdot 4\mu}{r_H^2 \cdot C_p} - \frac{(\lambda + 2 \cdot \mu)}{C_p^2} \right]} \quad (26)$$

Обозначим:

$$\mu(\omega) = r_H \left(\frac{1}{r^2} + \frac{i\omega}{r \cdot C_p} \right) / \left[\frac{4\mu}{r_H^3} + \frac{i\omega \cdot 4\mu}{r_H^2 \cdot C_p} - \frac{(\lambda + 2 \cdot \mu)}{C_p^2} \right].$$

Тогда выражение (26) запишем в виде :

$$S_H(\omega) = S_\sigma(\omega) \cdot \mu(\omega).$$

Величину $\mu(\omega)$, согласно работе [95], можно трактовать как комплексную характеристику излучателя продольных волн при наблюдениях на расстоянии $r < r_H$.

Выражение (27) физически можно трактовать следующим образом. Представляя давление $p(t)$ как функцию на входе колебательной системы излучателя, а смещение $u(t)$ - как функцию на выходе, можно свести анализ действия излучателя к

рассмотрению действия некоторого эквивалентного ему фильтра. Выражение (27) позволяет изучить вопрос о влиянии излучения на форму сейсмических колебаний.

Для случая гармонического возбуждения $p(t) = p_0 \cdot e^{i\omega t}$ на больших расстояниях от источника $r \gg r_H$ в работе [95] приведено решение этой задачи.

В данном случае рассматривается случай действия на границе излучателя напряжения:

$$\sigma(t) = \begin{cases} 0; \\ \sigma_{\max} (1 + t/\tau_1); \\ \sigma_{\max} (1 - t/\tau_2). \end{cases}$$

Спектральная характеристика этого сигнала будет:

$$|S_\sigma(\omega)| = \frac{\sigma_{\max}}{\omega^2} \left(\frac{1 - \cos \omega\tau_1}{\tau_1} + \frac{1 - \cos \omega\tau_2}{\tau_2} \right). \quad (28)$$

Поскольку при сейсмическом воздействии на различные сооружения в качестве критерия разрушения взята скорость смещения, целесообразно исследовать амплитудный спектр скоростей. Из выражения (26) нетрудно получить этот спектр путем умножения равенства на $i\omega$:

$$F(\omega) = |S_V(\omega)| = \frac{|S_\sigma(\omega)| \cdot r_H \cdot C_p \cdot \omega \sqrt{C_p^2 + r^2 \cdot \omega^2}}{4\mu \cdot r^2 \sqrt{\left(\frac{C_p}{r_H}\right)^4 + \left(1 - \frac{\lambda + 2\mu}{2\mu}\right) \left(\frac{C_p}{r_H}\right)^2 \cdot \omega^2 + \left(\frac{\lambda + 2\mu}{4\mu}\right)^2 \cdot \omega^4}} \quad (29)$$

где $|S_\sigma(\omega)|$ - определяется по формуле (28).

Полученное аналитическое выражение позволяет выполнить расчет спектра сейсмических колебаний в зависимости от физико-технических свойств грунтового массива и размеров излучателя.

Для численного решения выражения (29) необходимо определить частоту собственных колебаний грунтового массива при действии

взрывной нагрузки. В работах [96, 97] решались задачи определения величины присоединенной массы грунта при действии периодической силы на грунтовое основание. При этом грунтовая среда рассматривалась как однородное упругое полупространство.

В действительности вряд ли грунт может рассматриваться как идеально упругое тело, поэтому нецелесообразно применять к нему крайне сложные математические и вместе с тем мало обоснованные физические решения.

Приближенное решение [98] основано на рассмотрении колеблющейся массы грунта в виде призмы определенной высоты h с площадью поперечного сечения, соответствующей площади передачи взрывного импульса (см. рисунок 14).

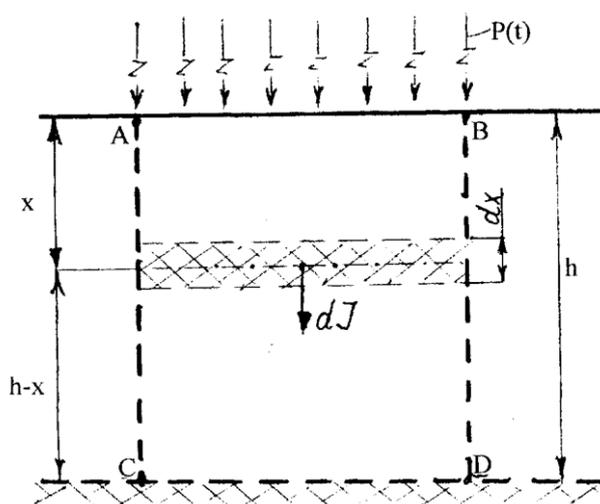


Рисунок 14. Условная модель грунтовой призмы ABCD

Если обозначить вертикальное напряжение через σ_1 , а относительное укорочение через ε_1 , то получим:

$$\sigma_1 = \varepsilon_1 \cdot E_{\text{при}},$$

где приведенный модуль $E_{\text{при}} = (1 - \nu) / (1 - \nu - 2\nu^2) \cdot E$.

Здесь E - модуль продольной деформации грунта при осевом сжатии. Сомножитель при E учитывает влияние горизонтальных напряжений и отсутствие поперечной деформации грунтовой призмы (в действительности некоторые боковые перемещения ее имеют место).

В данном случае рассматриваем действие импульсной нагрузки, создающей относительно большой импульс, поэтому можно ограничиться лишь изучением собственных упругих продольных колебаний.

В динамических, быстро протекающих процессах перемещения основания можно вычислить, применяя гипотезу Винклера. Нетрудно показать, что использование схемы упругого полупространства ($E_{пр}$) и гипотезы Винклера в ряде случаев приводят к одинаковым результатам, несмотря на некоторые упрощения модели грунтового основания в случае использования коэффициента постели.

Будем изучать продольные упругие колебания грунтовой призмы ABCD, вызванные действием импульсной нагрузки по сечению AB. В результате этого воздействия сечение AB, в центре которого помещаем начало координат призмы грунта, получает начальное продольное перемещение u_0 и начальную скорость \dot{u}_0 .

Продольное перемещение в произвольном сечении и относительное укорочение на расстоянии x от начального сечения обозначим соответственно через u_x и ε_x , а погонную массу призмы грунта – через $m_{гр} = m_9 \cdot F$; m_9 - масса единицы объема, F - площадь сечения призмы. Будем считать, что импульсная нагрузка, приложенная к поверхности грунта, вызывает колебания только этой призмы, и

сил трения по ее боковым поверхностям АС и ВД не возникает.

Частота продольных колебаний призмы грунта определяется согласно [98]:

$$\omega = \frac{\pi}{2h} \sqrt{\frac{E_{np} \cdot F}{m_{zp}}} . \quad (31)$$

Высота колеблющейся призмы грунта согласно [98]:

$$h = E_{np}/C, \quad (32)$$

где C - коэффициент постели, который определяется согласно справочным данным [99].

Собственная частота различных грунтов, определяемая по формуле (31), будет:

1. Мелкозернистый песок: $\rho_{0}^{ck} = 1,65$ г/см³; $E = 74,3$ МПа; $E_{np} = 100$ МПа; $C^{оп} = (1,4-3,0) \times 10$ Н/см³; $\omega_1 = 54-172$ с⁻¹; $f_1 = (8,6 - 18,5)$ Гц; $f_2 = (25,8-55,5)$ Гц.

2. Гравийно-галечниковая смесь: $\rho_{0}^{ck} = 2,30$ г/см³; $E = 300$ МПа; $E_{np} = 360$ МПа; $C^{оп} = (100-120)$ Н/см³; $\omega_1 = (172-205)$ с⁻¹; $f_1 = (27,4-32,6)$ Гц; $f_2 = (82,2 - 97,8)$ Гц.

3. Супесь твердая: $\rho_{0}^{ck} = 2,25$ г/см³; $E = 330$ МПа; $E_{np} = 489$ МПа; $C^{оп} = (95-108)$ Н/см³; $\omega_1 = (142-214)$ с⁻¹; $f_1 = (22,6 - 34,1)$ Гц; $f_2 = (68-102)$ Гц.

4. Супесь структуры: $\rho_{0}^{ck} = 1,62$ г/см³; $E = 150$ МПа; $E_{np} = 188$ МПа; $C^{оп} = (18-36)$ Н/см³; $\omega_1 = (51-100)$ с⁻¹; $f_1 = (8,1-16)$ Гц; $f_2 = (24,3 - 48)$ Гц.

5. Суглинок лессовидный: $\rho_{0}^{ck} = 1,64$ г/см³; $E = 400$ МПа; $E_{np} = 573$ МПа; $C^{оп} = (30-48)$ Н/см³; $\omega_1 = (154 - 244)$; $f_1 = (25 - 40)$ Гц; $f_2 = (75 - 120)$ Гц.

Применительно к грунтам с различными структурными особенностями проведены лабораторные исследования на виброустановке [100], которые позволили определить собственные частоты

колебаний грунтовой системы, при которой происходит лавинное разрушение структурных связей и уплотнение грунта. Опыты с барханным и речным песком, а также с лессовидным суглинком различной влажности показали, что в диапазоне частот до 100 Гц, при ускорении колебаний $(0-5) \cdot g$ и длительности вибрации резкое развитие деформаций образцов наблюдается при строго фиксированных частотах. При этом в несвязных грунтах, состоящих из отдельных минеральных частиц, установлена одна характерная частота, а в грунтах агрегатного сложения - две таких частоты. Абсолютные значения этих частот зависят от влажности и крупности частиц грунта и изменяются в следующих пределах: для пылеватого барханного песка сухого - 180 Гц, водонасыщенного - 60 Гц, влажного - 75 Гц; речного песка сухого - 90 Гц, влажного - 50 Гц, водонасыщенного - 35 Гц.

Лессовидный суглинок максимально деформируется соответственно при следующих частотах: влажный - 85 и 20 Гц, водонасыщенный - 60 и 15 Гц. Сухой лессовидный суглинок, имеющий весьма высокую прочность, в указанном диапазоне частот не разрушается.

Таким образом, полученные теоретические частоты свободных колебаний различных грунтов, хорошо согласуются с приведенными выше экспериментальными данными.

Кроме того, в результате проведенного спектрального анализа уравнения (29) и импульсов с различными силовыми и временными параметрами установлены следующие особенности характера изменения амплитудно-частотного спектра импульса взрыва:

1. Распределение плотности амплитудно-частотного спектра импульса отличается одной-двумя характерными частотами f_1 и f_2 , в области которых наблюдается соответственно два неравнозначных максимума спектральной плотности, причем оба значения частоты находятся в низкочастотной области спектра.

2. В зависимости от размеров излучателя колебаний r_H между двумя указанными частотами наблюдается перераспределение плотности: с ростом r_H от очага взрыва преобладает частота f_2 , с уменьшением r_H – частота f_1 .

3. С удалением от очага взрыва в спектре начинают преобладать более низкие частоты, что свидетельствует о поглощении высокочастотных составляющих спектра в ближней зоне взрыва.

4. Независимо от размеров источника излучений частота f_2 имеет постоянное значение и определяется характеристиками грунта (фильтра).

5. Частота f_1 изменяется в зависимости от размеров излучателя и линейно растет с ростом соотношения C_p / r_H .

Радиус сейсмоизлучателя r_H при расчетах принимается равным радиусу скважины в грунте.

Следует также отметить, что взрывная нагрузка, создаваемая при горении газоздушных смесей внутри объема скважины, характеризуется двумя параметрами: максимальным избыточным давлением σ_{\max} и временем его нарастания τ_1 . Время спада давления до нуля τ_2 практически не влияет на спектральный состав импульса.

Взрывную нагрузку с нарастанием можно аппроксимировать следующим образом (рисунок 15).

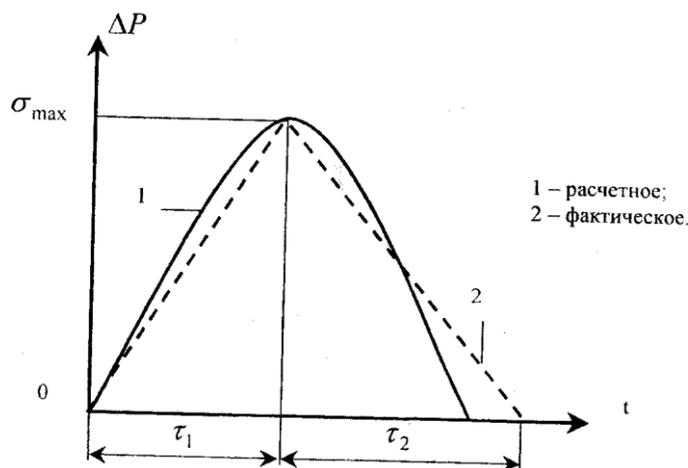


Рисунок 15. Изменение взрывной нагрузки во времени

Взрывную нагрузку, действующую на грунтовый массив, представим в виде $\sigma = \sigma_{\max} \cdot \sin \lambda t$. Продолжительность действия взрывной нагрузки $\tau = \pi/\lambda$ (рисунок 15), поэтому максимальное уплотнение грунта происходит, когда вынужденная частота колебаний от взрывной нагрузки λ близка к частоте собственных колебаний грунтовой системы ω .

2.5 Определение зоны разрушения структуры и уплотнения грунта при взрывных воздействиях

По сравнению с разрушением структуры при ударных, вибрационных и фильтрационных воздействиях характерной особенностью действия взрывов на грунт является многообразие причин, вызывающих разрушение их структуры. Непосредственными причинами разрушения структуры грунтов взрывах могут быть: прохождение ударной волны по системе частиц

грунта в поровой воде, взаимное смещение частиц грунта из-за образования и пульсации газовой полости и фильтрационные силы, вследствие газов взрыва на воду и ее движения по порам грунта. Каждая из этих причин может вызвать разрушение структуры грунта. Для разработки достоверных расчетных методов оценки действия взрывов необходимо из большого числа действующих факторов выделить наиболее существенные, которые в основном и определяют разрушение структуры грунтов.

Основной причиной разрушения структуры и последующего уплотнения грунтов считаются взаимные смещения самих частиц грунта при взрывных воздействиях [88].

Взаимные смещения частиц при действии ударных волн определяются изменением напряжений в скелете грунта по сравнению с напряжениями от собственного грунта и пригрузки. Для характеристики изменения напряженного состояния скелета грунта введем соотношение [88]:

$$\Delta = \sigma(p_{\max}) / \sigma(\gamma_{\text{гр}}), \quad (33)$$

где $\sigma(p_{\max})$ - максимальное давление ударной волны, передающейся на скелет грунта;

$\sigma(\gamma_{\text{гр}})$ - напряжение от собственного веса грунта и пригрузки.

С увеличением Δ величина взаимных смещений частиц за период действия взрывной волны увеличивается. Вводя критическое значение $\Delta_{\text{к}}$, при котором происходит смещение частиц, вызывающее полное разрушение структуры грунта, можно определить контуры области, очерчивая ее линией $\Delta = \Delta_{\text{к}}$. В частном случае однородного грунта

зависимость (33) принимает вид:

$$\sigma = \Delta_k \cdot \Upsilon_{гр} \cdot z. \quad (34)$$

Сжимающие напряжения $\sigma(p_{max})$ в скелете грунта в результате действия ударной волны можно определить, рассматривая в процессе сжатия грунт, как трехкомпонентную среду. Характер процесса сжатия водонасыщенных грунтов в период действия взрывных волн, а, следовательно, и характер взрывных воздействий в значительной мере зависят от длительности взрывной волны и водопроницаемости грунтов.

Длительность действия взрывных волн в зависимости от мощности и расстояния до него может изменяться от миллисекунд до нескольких десятых долей секунды. В сравнительно маловодопроницаемых водонасыщенных песчаных грунтах и тем более супесях, лессах, суглинках за этот малый промежуток не может произойти существенного отжатия воды из пор грунта. Поэтому для этих условий можно принять, что сжатие грунта за период действия взрывных волн определяется в основном объемной сжимаемостью трехкомпонентной среды (вода, газовые пузырьки, твердые частицы) и деформируемостью скелета грунта. Таким образом, сжатие сравнительно мало водопроницаемых грунтов при взрывных воздействиях происходит в условиях, близких к испытанию грунтов, в так называемой закрытой системе, т.е. без оттока воды из образца.

Под фазами грунта в дальнейшем понимаются составляющие компоненты грунта: вода, газ, минеральные твердые частицы. Каждая из них рассматривается как однородная среда, подчиняющаяся определенным законам

деформирования.

Под скелетом грунта понимается совокупность минеральных частиц и среды, осуществляющей непосредственную связь структурных элементов. Связь между структурными элементами грунта может иметь как водноколлоидную, так и цементационную природу.

Основными параметрами многофазного грунта являются объемная концентрация твердых частиц $m_T = V_T/V$. Объемная концентрация жидкости m_B и газа m_G : $m_B = V_B/V$; $m_G = V_G/V$, пористость $m = V_{II}/V$. Здесь V - объем элемента; V_{II} - объем пор; V_G - объем пор, занятый газом. Очевидно, что $m_T + m_B + m_G = 1$.

Удобными характеристиками являются коэффициент пористости $e = V_{II}/V_T = m/m_T = m/(1 - m)$; степень водонасыщения $I_B = m_B/m = m_B/(m_B + m_G)$.

Общее изменение объема элемента грунта ΔV при всестороннем сжатии складывается из изменений компонентов, т.е.:

$$\Delta V = \Delta V_B + \Delta V_T + \Delta V_G \quad (35)$$

В большом диапазоне нагрузок сжатие воды и тем более минеральных частиц можно считать линейно зависящим от давления и представить в виде [88]:

$$\Delta V_B = \frac{p}{E_B} \cdot V = \beta_B \cdot V_B \cdot p, \Delta V_T = \frac{p}{E_T} \cdot V_T = \beta_T \cdot V_T \cdot p, \quad (36)$$

где V_B и V_T - объемы воды и твердых минеральных частиц;

E_B и E_T - модули объемной сжимаемости воды и твердых частиц;

p - дополнительное избыточное давление в воде, окружающей твердые частицы.

Учитывая, что температура водонасыщенного

грунта практически не меняется, сжимаемость газа можно рассматривать в предположении изотермического процесса. Растворимостью газа в воде за короткий период действия взрывной волны можно пренебречь. В этих условиях изменение объема газа:

$$\Delta V_{\Gamma} = \frac{p}{p_1 + p} \cdot V_{\Gamma}, \quad (37)$$

где V_{Γ} - объем заземленного газа;

p_1 - первоначальное давление в поровой воде, включая атмосферное.

Подставив (36) и (37) в уравнение (35) и перейдя к объемной деформации, получим:

$$E_{\vartheta} = \beta_{\text{В}} \cdot m_{\text{В}} \cdot p + \beta_{\text{Т}} \cdot m_{\text{Т}} \cdot p + m_{\Gamma} \cdot p / (p_1 + p). \quad (38)$$

Из условия неразрывности при отсутствии оттока воды суммарная объемная деформация компонент должна быть равна объемной деформации скелета грунта, т.е. $\varepsilon_{\vartheta} = \varepsilon_{\text{ск}}$. В свою очередь объемная деформация скелета за счет изменения объема пор:

$$\varepsilon_{\text{ск}} = e_1 - e(\sigma) / (1 + e_1), \quad (39)$$

где e_1 - начальный коэффициент пористости;

$e(\sigma)$ - коэффициент пористости при сжимающих напряжениях σ в скелете грунта.

Учитывая, что часть нагрузки q передается на поровую воду p , а часть на скелет грунта σ , из условия равновесия имеем:

$$q = \sigma + p. \quad (40)$$

Решив совместно систему уравнений (38-40), получим уравнение сжатия элемента грунта в условиях закрытой системы:

$$e_1 = e(\sigma) / (1 + e_1) = (\beta_{\text{В}} \cdot m_{\text{В}} + \beta_{\text{Т}} \cdot m_{\text{Т}})(q - \sigma) - m_{\Gamma}(q - \sigma) / (p_1 + q - \sigma). \quad (41)$$

Уравнение (41) получено в предположении мгновенной деформируемости всех компонент и самого скелета грунта. Не учитываются их вязкие

свойства, влияние которых, особенно вязкости скелета грунта, в условиях быстропротекающих взрывных процессов может быть существенно.

Решение уравнения (41) определяется видом принимаемой зависимости $e(\sigma)$. Например, приняв ее в виде спрямленной компрессионной зависимости $e(\sigma) = -a\sigma + e_1$ или $\varepsilon_{ск} = a\sigma / (1+e_1) = \beta_{ск} \cdot \sigma$ уравнению (41) можно придать вид:

$$\sigma^2(\beta_{т.в} + \beta_{ск}) - \sigma[(p_1 + q)(\beta_{т.в} + \beta_{ск}) \cdot g \cdot \beta_{тв} - m_{г}] + (p_1q + q^2) \cdot \beta_{т.в} + q \cdot m_{г} = 0, \quad (42)$$

где $\beta_{т.в} = \beta_{т} \cdot m_{т} + \beta_{в} \cdot m_{в}$.

Объемная сжимаемость скелета грунта может быть получена по результатам испытаний сухих грунтов. Сжимаемость грунтов при статическом нагружении, как известно, значительно больше, чем при динамических воздействиях. К сожалению, исследований сжимаемости практически сухих грунтов при взрывных воздействиях выполнено ограниченное количество.

Для практических расчетов зон разрушения структуры грунта, т.е. в пределах относительно малых давлений, графики $\sigma\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon}\right)$ можно аппроксимировать зависимостью в виде:

$$\varepsilon_{ск} = a\sigma / (\sigma + b). \quad (43)$$

Коэффициенты a и b будут следующие: мелкозернистый песок - $a = 0,048$, $b = 2,2$ МПа. гравийно-песчаная смесь - $a = 0,005$, $b = 0$ супесь и суглинок твердые - $a = -0,02$, $b = 8$ МПа; супесь нарушенной структуры и лессовидный суглинок - $a = -0,14$, $b = 6$ МПа.

Тогда зависимость (42) с учетом (43) приобретает вид:

$$a\sigma / (\sigma + b) = (q - \sigma)(\beta_{т.в} - m_{г}) / (p_1 + q - \sigma). \quad (44)$$

Анализ уравнений (42) или (44) показывает, что в зависимости от величины сжимаемости компонентов β_T , β_B и скелета грунта $\beta_{ск}$ возможно различное распределение давлений между скелетом грунта σ и поровой водой p . Объемная сжимаемость минеральных частиц на порядок меньше сжимаемости воды, и поэтому роль их сжимаемости в распределении нагрузок между скелетом грунта и поровой водой незначительна и в большинстве случаев может не учитываться.

В водонасыщенных грунтах существенная передача взрывной нагрузки на скелет возможна в весьма малосжимаемых грунтах, т.е. при малой величине коэффициента $\beta_{ск}$. Так, например, в полностью водонасыщенном плотном песке с пористостью $m = 0,4$, $m_T = 0,6$, $e_1 = 0,67$ $\beta_{ск} = 10^{-2}$ МПа⁻¹ учет объемной сжимаемости воды (10^{-3} МПа⁻¹) и минеральных частиц (10^{-4} МПа⁻¹) по зависимости (44) приводит к передаче нагрузки на скелет грунта $\sigma = 0,044 \cdot q$, а остальная, большая часть нагрузки - q воспринимается поровой водой.

С увеличением содержания газообразной составляющей сжимаемость поровой воды с газом увеличивается до 2×10^{-3} МПа⁻¹ и сжимаемость водонасыщенного грунта все в большей мере начинает определяться объемной сжимаемостью скелета грунта. В свою очередь, это приводит к увеличению напряжений, передаваемых на скелет грунта $\sigma = 0,18 \cdot q$, и соответствующему уменьшению давлений, воспринимаемых поровой водой.

Задача определения границы зоны разрушения структуры и уплотнения грунта при взрывных воздействиях сводится к совместному рассмотрению условия разрушения структуры и напряженного

состояния грунта при взрыве. Учитывая изложенное, можно предложить приближенный, полуэмпирический метод определения контура зоны разрушения структуры и уплотнения грунтов при взрывах. В качестве условия разрушения структуры принимается зависимость (34), а напряжения в скелете грунта определяются по уравнениям (41), (43) или в простейших случаях - по зависимости (42), где всестороннее давление q принимается равным максимальному давлению на фронте ударной волны p_{\max} .

Для определения p_{\max} можно воспользоваться, эмпирической формулой, полученной при обработке данных в работе [63].

Тогда в соответствии со схемой на рисунке 16 определение границы зоны разрушения структуры грунта сводится к решению системы уравнений:

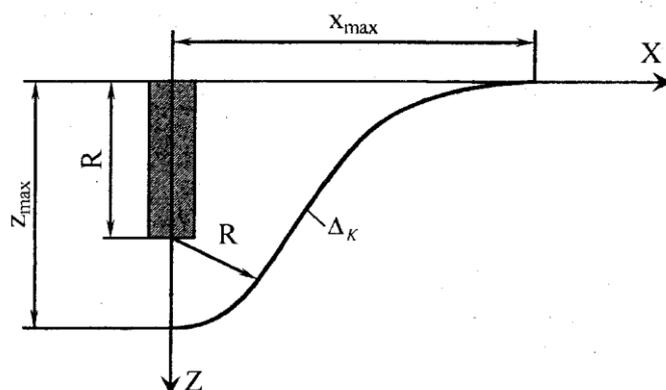


Рисунок 16. Зона разрушения структуры грунта при взрывном воздействии

$$a\sigma/(\sigma + b) = (p_{\max} - \sigma)[(\beta_T \cdot m_T + \beta_B \cdot m_B) - m_\Gamma / (p_1 + \gamma \cdot Z + p_{\max} - \sigma)],$$

(45)

$$\sigma = \Delta_k \cdot \gamma_{гр} \cdot z, \quad (46)$$

$$x = [R^2 + (h - z)^2]^{1/2}, \quad (47)$$

$$P_{\max} = \Delta P \cdot (R_0)^{-\mu\sigma} \quad (48)$$

где ΔP - максимальное избыточное давление в объеме при взрывном горении ГВС; $R_0 = R/r_{\text{СКВ}}$ - безразмерное расстояние.

Задавшись R , по зависимости (48) определяем P_{\max} , а затем по известной Δ_k из уравнения (46) находим z , а из уравнения (47) - величину x , т.е. координаты зоны разрушения структуры в радиусе R . Последовательно увеличивая R , можно построить график зоны разрушения структуры.

Величину Δ_k приходится определять экспериментально, путем взрыва в шурфе и замера глубинными реперами пористости, максимальной глубины разрушения структуры и уплотнения z_{\max} .

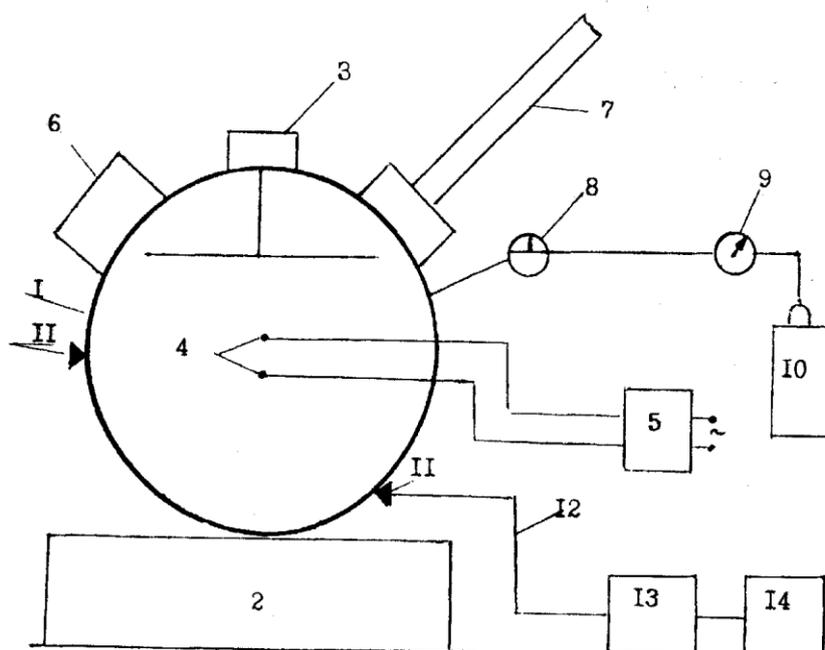
ГЛАВА 3. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО УПЛОТНЕНИЮ ГРУНТА ГАЗОВЗРЫВНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

3.1 Экспериментальная установка и измерительная аппаратура

Блок-схема экспериментальной установки и регистрирующие приборы приведены на рисунке 17. Взрывная камера размерами $D \times L \times \delta - 800 \times 500 \times 10$ мм изготовлена в виде цилиндра. Камера жестко соединена с подставкой. В камере предусмотрен проем диаметром 180 мм, который может изменяться по сечению и полностью закрываться. Необходимое количество пропана подавалось в камеру из баллона и фиксировалось газовым счетчиком. Режим и время работы вентилятора, при которых достигалась однородность смеси, определялись в период наладочных работ. Однородность смеси устанавливалась путем отбора проб в разных точках объема с последующим химическим анализом.

Зажигание горючей смеси осуществлялось в центре объема искрой электролитического конденсатора. Величина энергии разряда не превышала 0,5 Дж.

Изменение давления в камере регистрировалось индуктивными датчиками давления ДМИ (рисунок 18), смонтированными в боковую стенку камеры. Сигнал, приходящий с датчика, усиливался усилителем ИД-2И и записывался шлейфовым осциллографом К115.



1 - цилиндрическая взрывная камера размерами $D \times L \times \delta$ 3 - 800x500x10 мм; 2- жесткая подставка под взрывную камеру; 3- вентилятор; 4- электроды; 5- катушка индуктивности; 6- проем; 7- отводящая труба диаметром 40мм; 8- газовый кран; 9- газовый счетчик; 10 - баллон с пропаном; 11 - датчики давления ДМИ; 12-подводящие кабели; 13-усилитель ИД-2И; 14- осциллограф К115

Рисунок 17. Блок-схема экспериментальной установки

Для тарировки датчика давления использовался тарировочный пресс, показания которого снимались с образцового манометра. Эксперименты проводились в закрытом помещении при начальном атмосферном давлении и температуре окружающего воздуха.

При выборе горючего газа для газозвушной смеси, используемого в экспериментах, исходили из

того, что он должен иметь хорошо изученные физико-химические параметры горения с воздухом и быть наиболее часто встречающимся в технологических процессах. Изложенным требованиям, обеспечивающим возможность наиболее полного обобщения экспериментальных результатов и сопоставления их с теоретическими данными, удовлетворяет пропан.

Этот углеводород, входящий в состав горючих природных газов, является основным сырьем для производства различных органических соединений. Термодинамические и физико-химические свойства пропана подробно изучены и приведены в различных монографиях, справочниках [101].

В таблице 1 даются основные газодинамические параметры горения для оптимальной концентрации пропана с воздухом, полученные при нормальных условиях.

Во всех проводившихся опытах электрической схемой предусматривалось автоматическое включение в определенной последовательности осциллографа и источника зажигания.

Тарировку всех датчиков проводили ежедневно в комплекте с преобразующей (усилитель) и регистрирующей (осциллограф) аппаратурой (что позволяет учесть систематическую ошибку цепи) с применением образцовых средств измерения и апробирования методов, точность которых известна.

Таблица 1

Физико-химические свойства пропановоздушной смеси оптимального состава

Исходные данные Газ	ρ , кг/ м ³	C, об. %	T ⁰ K горе ния	U _H , м ² /с	$v \cdot 10^{-4}$ м ² /с	$D \cdot 10^{-4}$ м ² /с	$\chi \cdot 10^{-4}$ м ² /с
1	2	3	4	5	6	7	8
Пропан C ₃ H ₈	1,3 25	4,1 8	2198	0,4 5	0,133	0,057	0,173

Примечание: Значение приведено для отдельного газа, а ρ, v, χ - для ГВС оптимального состава.

При тарировке фиксировали отклонение луча гальванометра на осциллографе, а с помощью средств измерения - исходную величину параметра. Для устранения влияния наводок все кабели в измерительной цепи экранировались, а все приборы и экраны кабелей заземлялись.

Тарировка всех датчиков давлений проводилась сжатым воздухом при помощи образцового манометра модели 11202 ГОСТ 6521-72 при 6 ступенях нагружения от 0,2 до 1,2 МПа (рисунок 18).

3.2 Подготовка образцов грунта в лабораторных условиях

Лабораторные исследования по уплотнению грунтов взрывными нагрузками проводились на песчаном и суглинистом грунте. Для приготовления

грунта нарушенной структуры использовался предварительно высушенный при температуре 105-110⁰С и измельченный в порошок суглинок. Его влажность в воздушно-сухом состоянии не превышала 1,5-2,0%. Порошок грунта, просеянный через сито с диаметром отверстия 0,5мм, равномерно увлажнялся в поддонах через пульверизатор дистиллированной водой до получения требуемой влажности. При этом, необходимое для увлажнения количество воды определялось по формуле:

$$G_{\text{ТР}} = \Theta_{\text{ТР}} [(1 + \omega_0)/(1 + \omega_{\text{ТР}}) - 1], \quad (49)$$

где $\Theta_{\text{ТР}}$ - масса грунта в сухом состоянии, кг;

ω_0 - влажность грунта в воздушно-сухом состоянии;

$\omega_{\text{ТР}}$ - требуемая влажность грунта.

В результате увлажнения был получен суглинок мягкопластичной консистенции с весовой влажностью $\omega = 10 - 28\%$. Для достижения одинаковой влажности приготовленный грунт в течение 3-5 суток выдерживали в герметически закрытой емкости.

Заполнение и уплотнение грунта производилось в лотке послойно следующим образом.

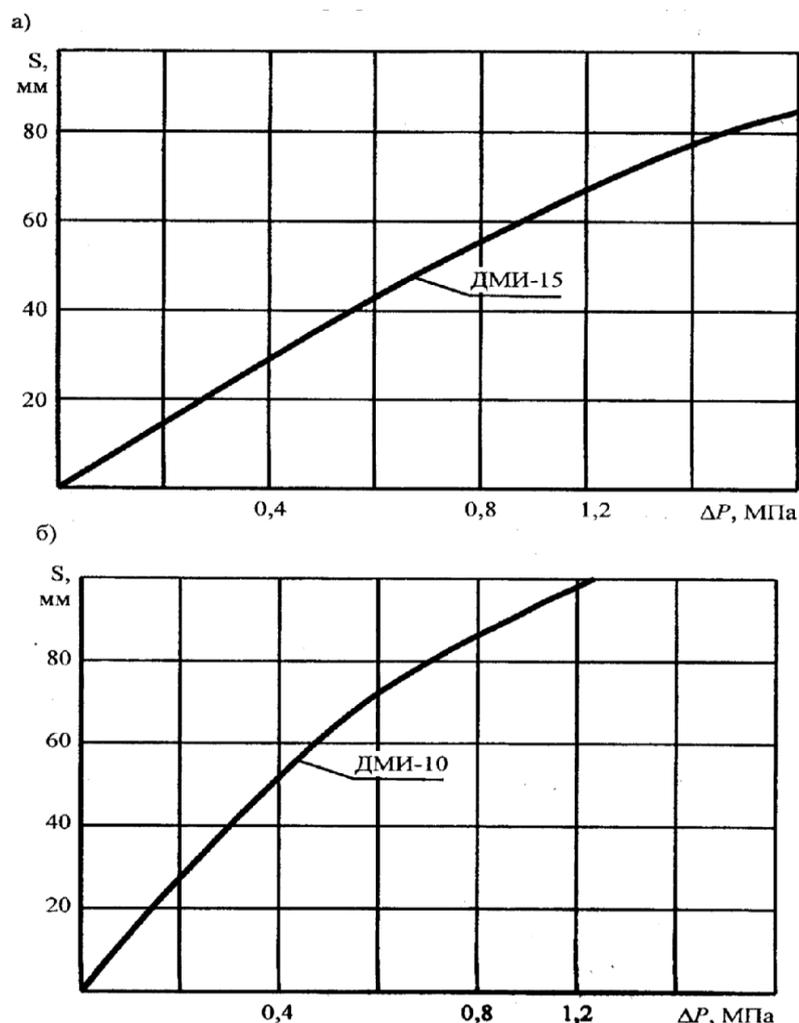


Рисунок 18. Тарировочный график датчиков давления ДМИ

На поверхность слоя грунта, слегка уплотненного вручную, укладывалась бумага и устанавливалась перфорированная плита, повторяющая с небольшим зазором своими очертаниями внутренние размеры лотка. На плиту, через жесткую балочную клетку, устанавливался домкрат, упирающийся в ригель рамной конструкции. Создавая определенное удельное давление, поддерживаемое до условной стабилизации перемещений плиты, получали грунт требуемой плотности и влажности. С каждым новым слоем грунта указанную последовательность

уплотнения повторяли до заполнения лотка. Послойная укладка грунта в 5-6 слоев производилась в течение 3-4 часов. Контроль плотности и влажности, производимый путем отбора грунта, показал, что по высоте лотка изменение плотности и влажности незначительно и составляет $\Delta\rho = 3\%$, $\Delta\omega = 2,5\%$. Определение прочностных свойств грунта производилось с помощью традиционных методов на сдвиговых и компрессионных приборах. Напряжения измерялись динамометрами типа ДОСМ-1-01, а деформации - индикаторами часового типа ценой деления 0,01мм.

3.3 Результаты экспериментальных исследований и их анализ

3.3.1 Выбор основных параметров газоимпульсного уплотнения

В экспериментах концентрация пропана изменялась от 4,5% до 5%, а площадь отверстия, равная 60 см², закрывалась картоном различной толщины. На рисунках 19 и 20 представлены типичные осциллограммы давление-время при взрывном горении пропановоздушной смеси в экспериментальной установке с истечением через отверстие.

В таблице 2 приведены экспериментальные данные при взрывном горении пропановоздушной смеси в камере объемом 0,5м³.

В экспериментах максимальное избыточное давление в камере изменялось от 0,380 до 0,823 МПа, а сбросное отверстие площадью $f = 60\text{см}^2$ закрывалось картоном толщиной 1 и 2мм. С помощью изменения скорости вращения вентилятора от 100 до 800 об/мин создавалась искусственная турбулизация горючей смеси.

Рассмотрим более подробно процесс горения горючей смеси в камере. Процесс, происходящий в камере, состоит из двух взаимосвязанных составляющих: горения (окисления) газообразного топлива и распространения пламени и роста давления. Окисление газообразного топлива протекает в два этапа: первый - период индукции или зажигания, когда условия для протекания реакции (температура и давление) создаются искусственно в каком-то ограниченном объеме горючей смеси; второй - собственно горение, когда эти условия самопроизвольно распространяются по всему объему смеси.

В лабораторных условиях объем горючей смеси, температура и давление смеси практически постоянны. Следовательно, регулировать процесс горения на данном этапе можно лишь изменяя состав горючей смеси.

С точки зрения стабильности технологического процесса наилучшим топливом является метан: он не имеет изомеров, теплота сгорания у него практически неизменна. Чем больше молекулярная углеводорода, тем больше вероятность наличия изомеров и различных непредельных соединений,

особенно если топливо представляет собой смесь горючих газов, например, пропана и бутана.

Реакция окисления носит цепной характер. Она начинается с образования активных частиц (ионов и радикалов), реагирующих с нейтральными молекулами. При этом число активных частиц не убывает, а прогрессивно увеличивается, что может привести к самоускорению процесса и в конечном счете к взрыву. В зависимости от соотношения температуры и давления исходной смеси реакция может носить взрывной и невзрывной характер.

С целью интенсификации процесса горения используется подвод извне дополнительной энергии для молекул. Варьируя количеством подводимой энергии, можно изменить характер процесса горения в диапазоне давлений, температур и составов горючей смеси. В данном случае интенсификаторами процесса являются турбулизация горючей смеси с помощью вентилятора, разрыв мембраны и добавка кислорода в горючую смесь, а также навеска аммонита с поджиганием смеси с помощью электродетонатора.

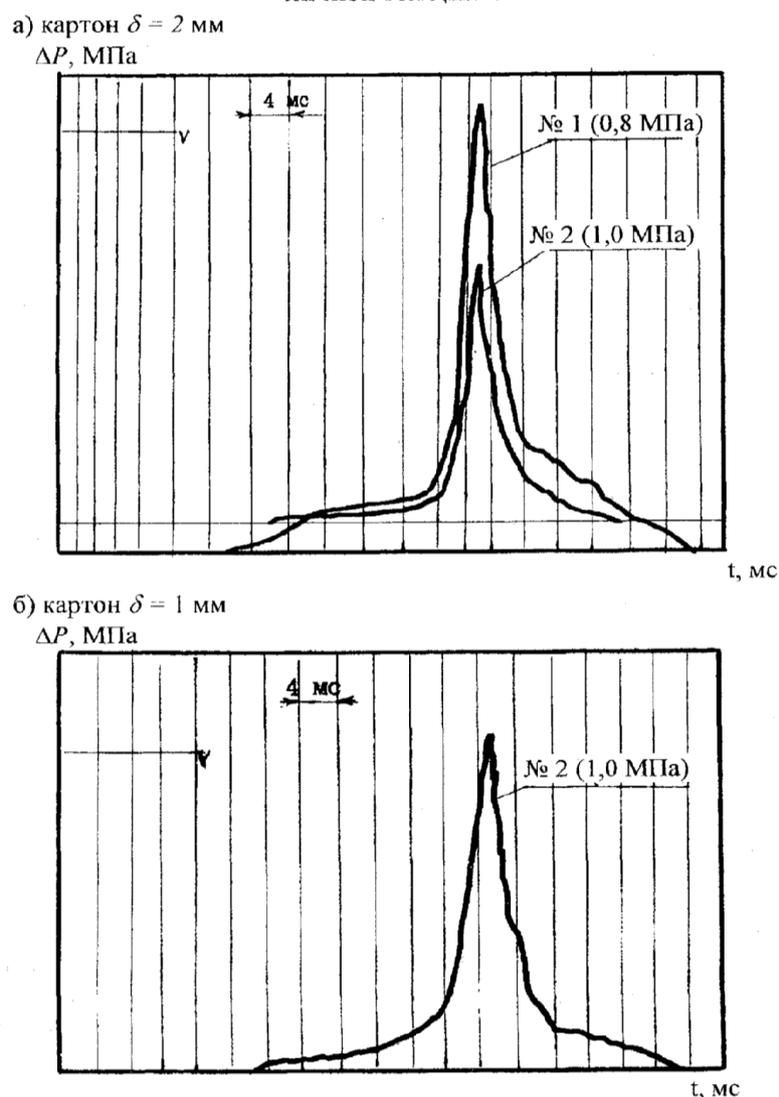
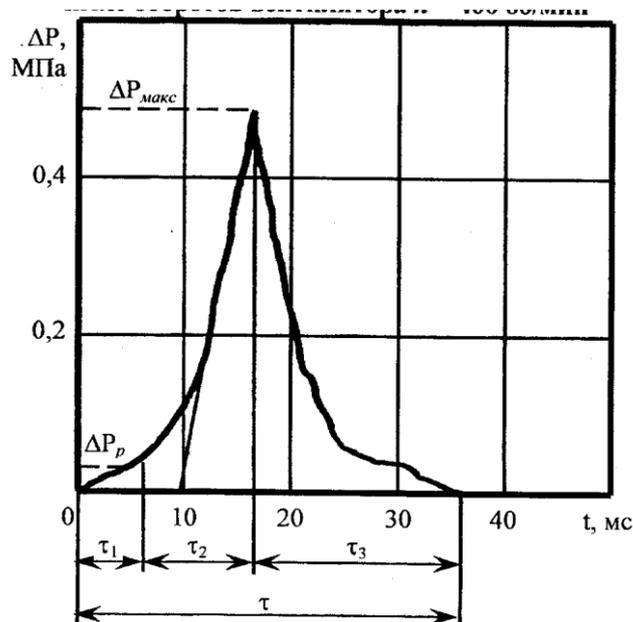


Рисунок 19. Индикаторные диаграммы давление-время при взрывном горении пропановоздушной смеси с отверстием, закрытым картоном различной ТОЛЩИНЫ

На процесс уплотнения грунтов оказывает существенное влияние частота вынужденных колебаний кратковременного импульсного воздействия.



τ_1 - время горения смеси до разрыва мембраны;
 τ_2 - время горения смеси после разрыва мембраны до достижения максимального давления в камере;
 τ_3 - время горения смеси до достижения атмосферного давления

Рисунок 20. Индикаторные диаграммы давление-время при взрывном горении пропановоздушной смеси с отверстием, закрытым картоном, и числе оборотов вентилятора $n=400$ об/мин

Так, например, вынужденная частота колебаний от взрывной нагрузки, определяемая согласно таблице 2 составляет 78-150Гц, что согласуется с теоретическими значениями собственных частот для различных грунтов.

Таблица 2

Экспериментальные данные по взрывному горению пропановоздушной смеси в камере объемом $0,5\text{ м}^3$ с отверстием, закрытым мембраной

№ экс	ΔP , МПа	Время, мс			dP/dt , МПа /с	Примечание
		τ_1	τ_2	τ_3		
1	2	3	4	5	6	7
1	0,505	8,8	6,4	15	78,9	Отверстие закрыто картоном толщиной 1мм. Скорость вращения вентилятора 200 об/мин.
2	0,51	9,0	6,5	16	78,5	
3	0,498	9,4	7,2	16,8	69,2	
4	0,526	8,6	6,3	14,7	83,5	
5	0,492	9,3	7,2	14,6	68,3	
6	0,516	8,9	6,2	13,5	83,2	
7	0,528	8,4	5,9	13,3	89,5	
1	0,628	7,8	5,6	12,4	111,8	Отверстие закрыто картоном толщиной 2мм. Скорость вращения вентилятора 400 об/мин.
2	0,635	7,9	5,7	11,9	107,6	
3	0,624	8,0	5,8	12,1	107,7	
4	0,642	7,6	5,5	11,7	116,7	
5	0,650	7,2	5,4	11,2	120,4	
6	0,642	7,4	5,5	11,8	116,7	
7						
1	0,720	6,8	5,3	11,6	135,8	Отверстие закрыто картоном толщиной 2мм. В горючую смесь добавлен O_2 . Скорость вентилятора 600 об/мин.
2	0,715	6,9	5,2	11,4	137,5	
3	0,710	7,0	5,3	11,5	134,0	
4	0,705	7,0	5,5	12,0	128,2	
5	0,714	7,1	5,6	12,2	127,5	
6	0,722	7,0	5,4	12,0	133,7	
7	0,730	6,7	5,1	11,6	143,1	

продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7
1	0,810	6,6	4,6	10,2	176,0	Отверстие полностью закрыто. В горючую смесь добавлен O ₂ и аммонит. Скорость вентилятора 800 об/мин.
2	0,823	6,5	4,4	9,8	187,0	
3	0,818	6,7	4,5	10,1	181,2	
4	0,802	6,8	4,8	11,2	167,1	
5	0,788	6,9	4,9	11,6	160,8	
6	0,795	6,8	4,8	11,2	165,6	
7	0,805	6,7	4,7	10,9	171,3	

Важной характеристикой процесса импульсного нагружения образца является скорость нарастания давления:

$$dP/dt = \Delta P_{\max} / \tau_1, \quad (50)$$

где ΔP_{\max} - максимальное давление в камере сгорания;

τ_1 - характерное время нарастания давления до достижения его максимального значения.

Таким образом, изменяя частоту вынужденных колебаний импульсного воздействия и скорость давления, можно варьировать степень воздействия на процесс уплотнения, регулировать его.

В экспериментах были получены 4 характерных режима уплотнения: 1 - максимальное давление составило не более 0,528 МПа, а скорость нарастания давления - (68-83) МПа/с; 2 - максимальное давление - не более 0,650 МПа, а скорость давления - (107-120) МПа/с; 3 - максимальное давление - не более 0,730 МПа, а скорость нарастания давления - (127-143) МПа/с; 4 - максимальное давление - 0,823 МПа, а скорость нарастания - (161-187) МПа/с.

В экспериментах было отмечено, что с увеличением предварительной искусственной турбулизации горючей смеси уменьшалось время сгорания смеси с 9,4 мс до 4,4 мс, что, в свою очередь, увеличивало скорость нарастания давления с 68 до 187 МПа/с.

3.3.2 Уплотнение песчаного грунта газовзрывным воздействием

С целью изучения уплотняемости песков при действии газовзрывных нагрузок были проведены исследования, которые позволяют определить механизм уплотнения грунта динамическими воздействиями.

В практике улучшения строительных свойств грунтов путем механического уплотнения используется основная деформационная характеристика несвязных грунтов - способность к более компактной переукладке минерального скелета как за счет уменьшения пористости грунта, так и за счет местных процессов, обуславливающих взаимное перемещение частиц, изменение толщины водных оболочек и медленное течение слоев связанной воды. Изменение пористости грунта может сопровождаться перемещением свободной воды относительно минерального скелета.

Сжимаемость грунтов под действием внешних нагрузок зависит от характера приложения и величины последних и определяется не только пористостью (производной плотности и

влажности), но и структурными особенностями сложения грунта, его минеральным составом.

Вследствие жесткости скелета даже рыхлые несвязные грунты при действии статических сжимающих нагрузок мало уплотняются. Уменьшение пористости несвязных грунтов при статическом сжатии происходит вследствие деформаций на контактах малосжимаемых минеральных частиц или в результате их взаимного проскальзывания, а также вследствие разрушения рыхлых частиц.

Плотность и напряженное состояние обычно характеризуется средней величиной для достаточно большого объема грунта. Однако для большинства несвязных грунтов характерна весьма разнообразная форма частиц и существенное изменение их размеров. Таким образом, в статическом несвязном грунте может отмечаться значительная неоднородность его структуры. Это является одной из причин ползучести скелета грунта как при статических, так и при динамических нагрузках.

Физические свойства мелкозернистого песка следующие: гранулометрический состав фракции 0,5-0,25мм - 0,2%; 0,25-0,125мм -20,0%; 0,125-0,1мм - 35,6%; 0,1-0,09мм - 11,2%; остальное – менее 0,09мм; удельная масса частиц - 27 кН/м³; плотность скелета минимальная - 1,42 г/см³; максимальная -1,68 г/см³; коэффициент пористости минимальный - 0,63; максимальный - 0,92.

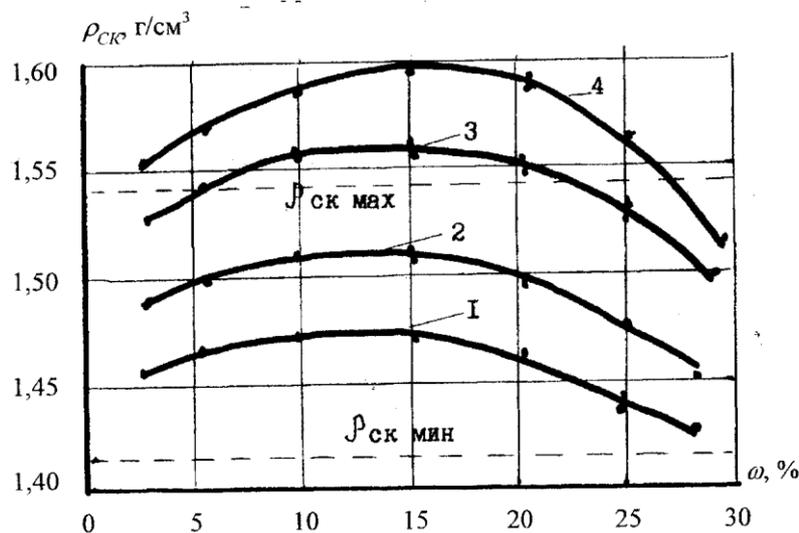
Эксперименты по уплотняемости песка проводились на лабораторной установке, показанной

на рисунке 17. Стальные стаканы диаметром 50мм и высотой 100мм заполнялись песком. Для удобства проведения опыта стаканы изготавливались с разъемным днищем, нижняя часть которого занимает объем 50 см^3 . На время проведения опыта весь стакан заполняется песком заданной влажности, устанавливается в камеру и подвергается взрывному воздействию. После проведения опыта стакан разнимался на две части, образец грунта подрезался таким образом, чтобы получить для исследования строго определенный объем, а именно 50 см^3 , т.е. объем нижней части стакана. После отделения и зачистки этой части образец взвешивался, высушивался и снова взвешивался, что позволило определить плотность грунта и его влажность после уплотнения. Опыты при каждой влажности грунта повторялись четырехкратно. Влажность грунта изменялась в диапазоне $4 \leq \omega \leq 26\%$, т.е. от сухого до водонасыщенного, при котором песок еще удерживал влагу. При последующем добавлении влага в грунте не удерживается.

Как показали опыты с высушиванием образцов, в результате газовзрывного уплотнения, начиная с влажности 16%, часть влаги в процессе уплотнения вытесняется из образца, в результате чего грунт приобретает плотность скелета, значительно более высокую, чем в случае невозможности оттока влаги из грунта, что может наблюдаться при уплотнении водонасыщенного грунта в массиве. Однако, как показывает опыт, в массиве при взрывном уплотнении водонасыщенный грунт или грунт,

близкий к водонасыщению, в результате динамической фильтрационной консолидации, которая выражается в частичном вытеснении влаги на определенных участках грунтового массива вокруг очага взрыва, непосредственно после взрыва и в течение нескольких часов способен изменять свою влажность и, следовательно, плотность скелета.

На рисунке 21 показано влияние влажности песка на его уплотняемость при различных уровнях напряжений. Как следует из рисунка 21, в зоне малой влажности (до 6 %) песок под действием взрывной нагрузки уплотняется до значений, не превышающих максимальной плотности, достигнутой в сухом состоянии при стандартных испытаниях постукиванием ($\rho_{ск \max}$). Вместе с тем при влажности более 12% плотность скелета песка превышает значение $\rho_{ск} = 1,55 \text{ г/см}^3$ при уровне напряжений 0,6-0,8 МПа, составляя при этом 1,56 и 1,59 г/см^3 соответственно. Поскольку в естественном залегании плотность скелета и пористость песка ограничивается рамками приведенных максимального и минимального значений $\rho_{ск}$, увлажнение такого песка также ограничено, т.е. влажность исходного грунта может быть доведена не более чем до 25%. В реальных условиях эта влажность не превышает 18-20%. Следовательно, уплотняя такой грунт взрывным воздействием в оптимальном режиме, достигнуть максимального значения плотности трудно.



1-0,2 МПа; 2 - 0,4 МПа; 3 - 0,6 МПа; 4 - 0,8 МПа

Рисунок 21. Влияние влажности на плотность скелета песка в зависимости от уровня напряжений

Если при вибрации основным фактором уплотнения грунта является рациональная длительная переукладка минеральных зерен скелета, которая наиболее ярко проявляется при самой низкой и самой высокой влажности песка [79], то при взрывном динамическом воздействии эффект уплотнения связан лишь с частичным взаимным перемещением зерен в контакте между ними (в сухом состоянии) или в результате изменения толщины водных пленок между ними (во влажном состоянии). При этом влажное состояние может способствовать уплотнению (при оптимальной влажности), либо препятствовать ему (при влажности, близкой к полному водонасыщению). При таком способе уплотнения эффект будет зависеть от соотношения исходной и оптимальной влажности.

Полученные экспериментальные зависимости

имеют большое значение для разработки приемов повышения эффективности взрывного уплотнения. Эти приемы основаны на предварительном улучшении исходных физических характеристик песчаного массива с целью создания благоприятных условий для его последующего уплотнения.

Кроме того, с увеличением статической нагрузки и уменьшением начального коэффициента пористости величина интенсивности динамических воздействий увеличивается и, следовательно, уменьшается возможность разрушения структуры, тогда как при отсутствии статической нагрузки уплотнение происходит при малых динамических воздействиях. Это объясняется тем, что при разрушении структуры грунта динамические воздействия преодолевают силы трения между частицами, а статическая сжимающая нагрузка вызывает повышение давлений в контактах между частицами, увеличивая таким образом сопротивление их смещению. В этом заключается роль пригрузки, уменьшающей или полностью ликвидирующей возможность разрушения структуры даже рыхлых несвязных грунтов при динамических воздействиях [41].

3.3.3 Уплотнение суглинка нарушенной структуры при газовзрывном воздействии

С целью изучения уплотняемости связных грунтов при действии газовзрывных нагрузок были проведены лабораторные исследования, которые позволяют определить закономерности уплотнения при динамических воздействиях.

В таблице 3 приведены экспериментальные данные по изменению физико-механических свойств суглинка при газовзрывном воздействии.

Таблица 3
Изменение физико-механических свойств суглинка при газовзрывном воздействии

№ п/п	До взрыва				После взрыва			
	$\rho_{ск},$ г/см ³	$\omega, \%$	C, МПа	φ^0	$\rho_{ск},$ г/см ³	C, МПа	φ^0	$\Delta P,$ МПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	1,53	10,4	0,12	26,0	1,54	0,124	26,20	0,23
3	1,52	10,1	0,124	26,1	1,54	0,137	26,3	0,32
4	1,54	10,5	0,125	26,8	1,56	0,127	27,0	0,23
5	1,52	10,6	0,10	24,5	1,5	0,105	24,6	0,41
6	1,53	10,5	0,11	25,1	1,57	0,115	25,3	0,42
7	1,52	10,2	0,108	24,6	1,56	0,119	25,0	0,41
8	1,54	10,8	0,10	23,8	1,57	0,108	24,2	0,40
9	1,53	10,8	0,095	23,0	1,63	0,104	23,6	0,51
10	1,52	10,2	0,114	23,1	1,63	0,116	23,5	0,52
11	1,52	10,4	0,099	22,3	1,60	0,10	23,1	0,51
12	1,53	10,0	0,086	22,5	1,61	0,095	23,3	0,52
13	1,52	10,3	0,082	24,1	1,69	0,088	24,2	0,81
14	1,53	10,6	0,078	23,5	1,68	0,082	23,8	0,82
15	1,52	10,0	0,085	24,2	1,68	0,092	24,3	0,81
16	1,53	10,1	0,086	23,7	1,69	0,09	23,9	0,82
17	1,54	20,5	0,05	11,6	1,54	0,055	11,8	0,22
18	1,53	21,0	0,046	10,8	1,54	0,049	11,0	0,21
19	1,54	20,2	0,040	9,8	1,56	0,045	9,8	0,20
20	1,53	20,5	0,038	10,5	1,54	0,040	10,9	0,21

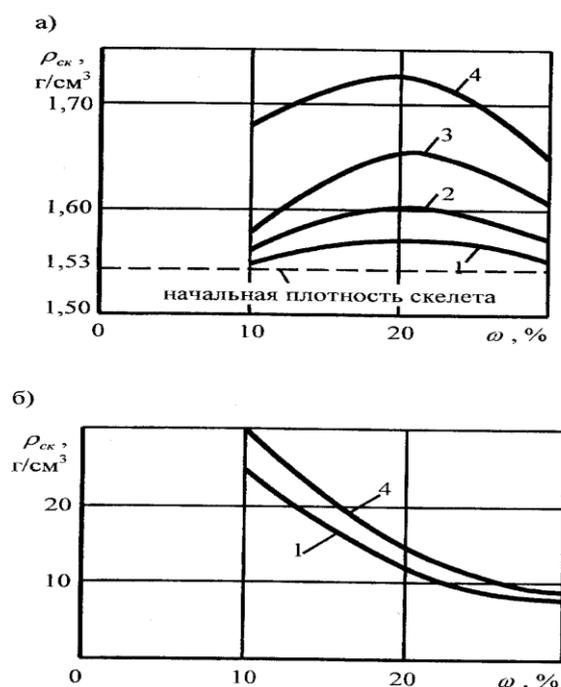
продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
21	1,54	19,6	0,078	12,1	1,60	0,08	12,4	0,41
22	1,52	21,0	0,07	10,8	1,59	0,072	10,9	0,40
23	1,53	20,8	0,056	9,8	1,58	0,065	10,4	0,41
24	1,54	21,0	0,066	10,9	1,60	0,070	11,2	0,42
25	1,53	72,0	0,070	11,1	1,67	0,075	11,9	0,53
26	1,52	21,0	0,079	12,4	1,66	0,085	12,9	0,51
27	1,52	22,0	0,075	13,0	1,63	0,08	13,6	0,52
28	1,53	20,5	0,064	12,5	1,66	0,069	13,8	0,52
29	1,52	21,4	0,060	10,2	1,71	0,064	11,3	0,83
30	1,53	22,1	0,058	12,5	1,70	0,060	13,2	0,82
31	1,52	20,8	0,054	12,0	1,71	0,061	13,5	0,83
32	1,54	19,0	0,068	14,2	1,68	0,074	14,5	0,82
33	1,54	29,4	0,031	8,5	1,56	0,035	8,8	0,22
34	1,54	30,2	0,026	8,0	1,55	0,030	8,3	0,21
35	1,52	32,4	0,020	7,6	1,53	0,022	7,8	0,20
36	1,53	31,6	0,025	7,2	1,55	0,029	7,4	0,21
37	1,52	31,2	0,020	7,4	1,56	0,025	7,7	0,43
38	1,53	32,0	0,018	6,8	1,57	0,023	7,1	0,42
39	1,54	31,5	0,019	6,7	1,59	0,023	7,2	0,43
40	1,54	32,0	0,021	6,9	1,60	0,025	7,5	0,41
41	1,51	31,6	0,023	7,0	1,61	0,029	8,1	0,52
42	1,53	30,0	0,028	8,1	1,61	0,035	8,7	0,53
43	1,52	28,8	0,025	7,6	1,58	0,032	8,0	0,51
44	1,52	30,4	0,030	7,7	1,58	0,035	8,1	0,52
45	1,52	30,0	0,018	6,8	1,65	0,025	7,5	0,82
46	1,53	31,2	0,024	7,0	1,66	0,029	7,8	0,83
47	1,53	30,6	0,020	7,3	1,65	0,025	8,1	0,82
48	1,53	31,2	0,019	6,8	1,64	0,022	7,2	0,80

Примечание: В таблице приняты следующие условные обозначения: $\rho_{ск}$ - плотность скелета

грунта; ω - влажность; φ - угол внутреннего трения;
 ΔP - избыточное давление в камере.

Исследования для определения оптимальных условий ведения газозрывных работ, и, в частности, оптимальной влажности, проводились с суглинком нарушенной структуры с плотностью скелета грунта $\rho_{ск}=1,50-1,56$ г/см³ и влажностью $\omega = 10-32\%$. На основе обработки экспериментальных данных таблицы 3 на рисунке 22 представлены зависимости изменения плотности скелета грунта и угла внутреннего трения в зависимости от влажности при различных уровнях нагружений.



1- 0,20МПа; 2 - 0,40МПа;3 - 0,60МПа;4 - 0,80МПа

Рисунок 22. Изменение плотности скелета грунта а) и угла внутреннего трения б) от влажности

Как следует из рисунка 22-а, значение оптимальной влажности $\omega_{\text{опт}}$ колеблется в исследованном диапазоне в пределах 18-22%, причем оно растет с увеличением уровня нагружения динамической нагрузкой с 0,2 до 0,8 МПа.

По данным экспериментов также было установлено, что минимальному значению влажности соответствуют максимальные величины сцепления и угла внутреннего трения (рисунок 22-б). Угол внутреннего трения в процессе увеличения уровня нагружения также изменяется, но незначительно (на 2-5°).

На рисунке 23 представлен график изменения плотности скелета грунта в зависимости от уровня нагружения. Вид кривой обусловлен свойствами грунта и удельной нагрузкой при динамическом воздействии. Кривая имеет вид гиперболы.

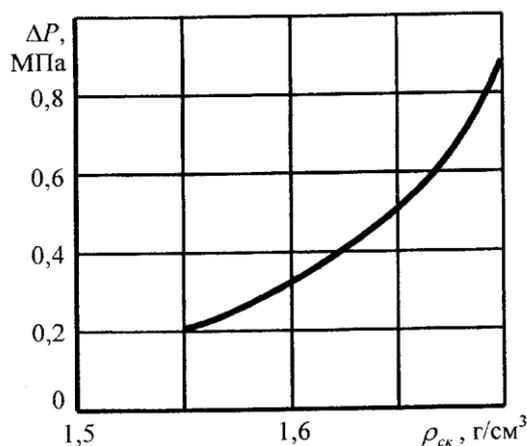


Рисунок 23. Изменение плотности скелета грунта в зависимости от уровня нагружений

На рисунке 24 представлены результаты обработки экспериментов по изменению сцепления от времени после уплотнения грунта взрывными нагрузками. Результаты замеров после уплотнения принимались за отправные, и предусматривалось

проведение дополнительных серий экспериментов. Кроме измерения прочностных характеристик в каждой серии осуществлялось измерение влажности.

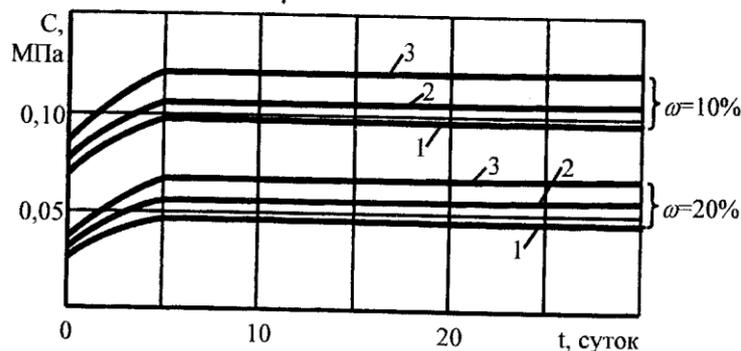


Рисунок 24. Изменение плотности скелета грунта от времени

Результаты обработки экспериментов показывают, что в суглинистых грунтах величина сцепления с течением времени увеличивается, причем основной ее прирост наблюдается за время, проведенное между первой и второй серией экспериментов. По абсолютной величине прирост сцепления составляет примерно 22-30% измеренной в первой серии.

С течением времени углы внутреннего трения грунтов после уплотнения увеличиваются, причем это изменение зарегистрировано только в период времени между первой и второй серией наблюдений. В последующей серии измерений изменений C и φ не наблюдается.

Существенную роль в формировании долговременной прочности суглинистых грунтов играет тиксотропное упрочнение грунта с течением времени. При воздействии на суглинистый грунт динамической нагрузки происходит нарушение

структурных связей между частицами грунта. В данном случае общая величина прочности будет зависеть от величины деформаций, при возрастании которой происходят нарушение всех видов связности и соответственно снижение прочности грунтов.

Однако при сближении частиц грунта увеличиваются силы между частицами тем значительнее, чем больше непосредственных точек контакта между ними. В связи с тем, что исследуется связный грунт с высоким содержанием глинистых частиц, то возможные изменения в грунте со временем следует объяснить процессами, среди которых существенную роль играют тиксотропные изменения.

3.3.4 Закономерности уплотнения грунтов газовзрывным воздействием

На основании проведенных лабораторных исследований предложен новый метод изучения уплотняемости грунтов (метод динамического уплотнения), позволяющий в сжатые сроки и с достаточной точностью изучать закономерности уплотнения в широком диапазоне изменения уплотняющих воздействий, плотности скелета грунта и его влажности.

В основе метода динамического уплотнения лежит теория уплотнения трехфазных грунтов, предложенная в работе [102]. По этой теории между весовым объемом скелета грунта при уплотнении $1/\rho_{ски}$ (величиной, обратной плотности скелета грунта $\rho_{ски}$) и логарифмом интенсивности уплотняющих воздействий существует линейная зависимость:

$$1/\rho_{ски} = 1/\rho_{ск} - A \cdot \lg (P_i/P_0) \quad (51)$$

где $1/\rho_{ск}$ - весовой объем скелета грунта после некоторого уплотнения;

A - угловой коэффициент, характеризующий интенсивность уплотнения грунта;

P_1 - избыточное давление в камере;

P_0 - атмосферное давление.

Результаты обработки лабораторных экспериментов по уплотнению суглинка нарушенной структуры при газовзрывном нагружении представлены на рисунке 25.

При уплотнении образцов грунта в условиях постоянной влажности наблюдается основная фаза установившегося процесса уплотнения, в пределах которой действительно прослеживается четкое проявление логарифмической зависимости. Однако при избыточном давлении в камере 0,2-0,3 МПа отмечается начальная фаза неустойчивого процесса уплотнения. Ее продолжительность зависит от начального весового объема скелета грунта. Если последний будет находиться в определенном соответствии с влажностью уплотняемого образца, то начальная фаза уплотнения или вообще не обнаруживается, или заканчивается при малой интенсивности динамического воздействия. Такое начальное состояние грунта может быть названо нормально уплотненным. По окончании основной фазы уплотнения наступает третья, при которой невозможно дальнейшее уплотнение грунта заданным взрывным импульсом. Все три фазы уплотнения отчетливо на рисунке 25.

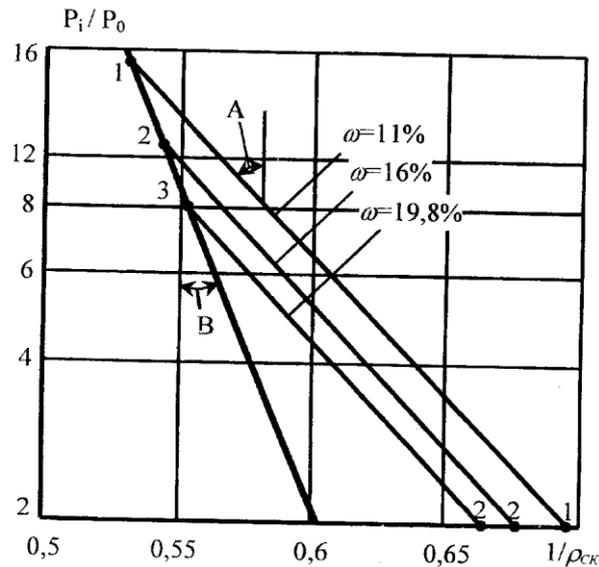


Рисунок 25. Графики результатов лабораторного уплотнения суглинка нарушенной структуры при газовзрывном нагружении ($A = 0,08 \text{ см}^3/\text{г}$, $B = 0,05 \text{ см}^3/\text{г}$)

Поскольку начальная фаза уплотнения может вообще не наблюдаться, если начальное физическое состояние грунта соответствует состоянию нормального уплотнения, а результаты уплотнения в конечной фазе (минимальный весовой объем скелета грунта) могут быть оценены заранее (зная объем заземленного воздуха), то главное в методе динамического уплотнения имеет основная фаза логарифмического закона уплотнения.

Основываясь на том, что метод динамического уплотнения позволяет отчетливо фиксировать особенности уплотнения грунтов в отдельных фазах, предлагается определять оптимальную влажность в грунте и максимальную плотность из условия обеспечения максимальной интенсивности уплотнения.

Максимальная интенсивность уплотнения обеспечивается в основной фазе логарифмического

закона уплотнения, которую можно назвать фазой эффективного уплотнения.

В этом случае под оптимальной влажностью $\omega_{\text{опт}}$ понимается наименьшее значение влажности грунта, при достижении которого вся приложенная работа уплотнения используется на эффективное уплотнение грунта, что обеспечивает получение минимальных значений весового объема скелета грунта V/ρ_{max} или максимальных значений плотности скелета ρ_{max} .

Для определения оптимальной влажности и максимальной интенсивности уплотнения по графикам зависимости $V/\rho_{\text{ск}} = f(P_i/P_0)$ (рисунок 25) определяют и в дальнейшем используют значение весового объема скелета грунта, соответствующее окончанию основной фазы и началу третьей фазы уплотнения.

ГЛАВА 4. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ ГАЗОВЗРЫВНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

4.1 Экспериментальная установка и измерительная аппаратура

Установка для уплотнения грунтового массива газовзрывным способом показана на рисунке 26. Компоненты газообразной взрывчатой смеси (кислород и пропан) по соединительным рукавам из баллонов 1 и 2 через редукторы 3, газовые счетчики 4, зажим 5, обратные клапаны 6, пламяпреградитель 7, газовый разъем 8 поступают в камеру сгорания 16. Когда камера сгорания заполняется смесью, на электродетонатор ЭД-2 с навеской аммонита 10 поступает напряжение от источника питания 9. Горючая смесь воспламеняется и происходит взрыв.

Расход газа определяется с помощью газовых счетчиков. Вентиль 5 регулирует синхронное падение давления и обеспечивает на стадии наладочных работ регулировку и контроль за соотношением смеси кислород-пропан. Камера сгорания представляет собой предварительно пробуренную в грунте скважину диаметром 500мм и глубиной 1500мм. Сверху скважины устанавливается крышка 15, которая удерживается от перемещения с помощью пригруза. После заполнения скважины горючей смесью людей отводят в безопасное место и производят взрыв.

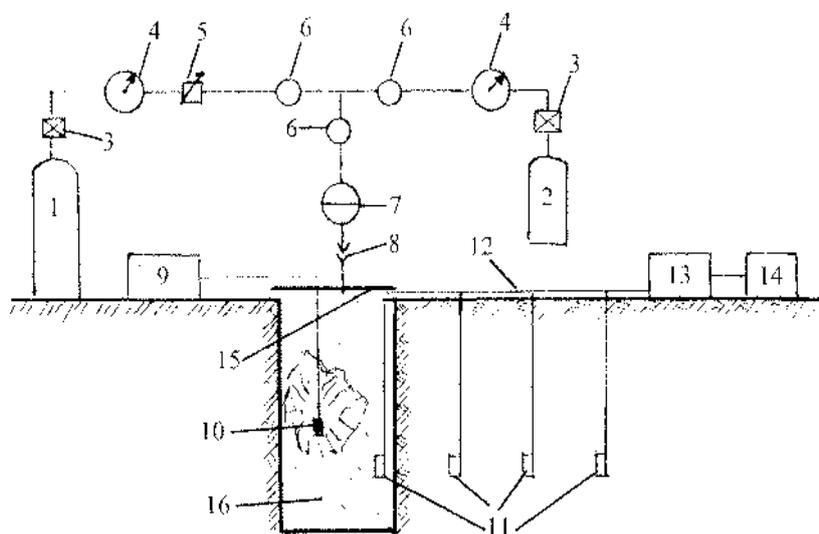
Для определения давления в скважине и в массиве грунта использовались датчики 11. Сигнал с датчиков 11 поступал на усилитель 13 с дальнейшей

регистрацией шлейфовым осциллографом 14. Перед проведением эксперимента датчики закладывались в грунт путем гидроподмыва, что обеспечивало хорошее обжатие их грунтом и точную запись.

Процесс уплотнения грунта контролировали с помощью глубинных марок, которые устанавливали до проведения взрыва. Для контроля за правильностью определения зон деформаций и уплотнения по каждому ряду марок были отобраны монолиты грунта. По этим монолитам определялись физико-механические свойства неуплотненного и уплотненного грунта.

Во всех проводившихся опытах электрической схемой предусматривалось автоматическое включение в определенной последовательности осциллографа и источников зажигания.

Тарировку всех датчиков проводили перед началом проведения каждого эксперимента в комплекте с преобразующей (усилитель) и регистрирующей (осциллограф) аппаратурой с применением образцовых средств измерения и апробирования методов, точность которых известна. При тарировке фиксировали отклонение луча гальванометра на осциллографе, а с помощью средств измерения - исходную величину параметра. Для устранения влияния наводок все кабели в измерительной цепи экранировались, все приборы и экраны кабелей заземлялись.



1 - баллон с кислородом; 2 - баллон с пропаном; 3 - редуктор; 4 - газовый счетчик; 5 - зажим; 6 - обратный клапан; 7 - пламяпреградитель; 8 - разъем; 9 - источник питания; 10 - электродетонатор ЭД-2 с навеской аммонита; 11-малогабаритный датчик давления ДМИ; 12 - подводящие кабели; 13 - усилитель ИД-2И; 14 - осциллограф КП5; 15 - металлическая крышка; 16 - горючая смесь в объеме скважины.

Рисунок 26. Установка для уплотнения грунтового массива газозрывным способом

Тарировка всех датчиков давлений производилась воздухом при помощи образцового манометра при 8 ступенях нагружения от 0,2 до 1,6 МПа.

4.2 Методика определения физико-механических свойств грунта в полевых условиях

Применение традиционных методов определения прочностных характеристик грунта на сдвиговых

приборах связано с огромными непроизводительными затратами на бурение и шурфование, извлечение монолита, парафинирование и транспортировку образцов с последующей их обработкой в лабораторных условиях, не соответствующих естественным условиям залегания (что неизбежно должно отразиться на уменьшении достоверности получаемых результатов). Кроме того, необходимо строго фиксировать место отбора и ориентировку образцов в пространстве к центру, а также извлекать большое количество монолитов при производстве одного эксперимента. Поэтому применение традиционных методов возможно лишь в отдельных случаях для сопоставления и дополнительного контроля величин искомых параметров.

В данном случае применялись методы исследований, использование которых при определении прочностных характеристик грунтов в условиях естественного залегания, во-первых, приведет к значительному сокращению производительности и уменьшению стоимости и трудоемкости экспериментов, во-вторых, обеспечит более высокую точность, достоверность и объективность определения количественных характеристик свойств грунтов и, в-третьих, позволит организовать эффективный и объективный контроль за исследованиями.

С помощью полевых методов совмещенных испытаний удельное сцепление грунта может определяться по результатам вращательного среза, а внутреннее трение - по результатам пенетрационных испытаний. Существуют различные способы совмещенных испытаний грунтов с применением

комбинированных наконечников различных конструкций. Раздельные испытания рекомендуются для грунтов полутвердой и твердой консистенций, поскольку погружение крыльчатого наконечника сопровождается минимальным повреждением естественной структуры грунта.

Для проведения полевых испытаний по определению удельного сцепления и удельного сопротивления внедрению был использован прибор ПКВ. Прибор состоит из вертикального телескопического стержня со сменным рабочим органом, горизонтальной рукоятки и рычага, трех пружинных динамометров и двух механических самописцев. Определенным усилием, передаваемым на рукоятку, стержень с наконечником внедряется в грунт, при этом прибор фиксирует на диаграммной ленте вертикального самописца сопротивление внедрению P (по вертикальной оси барабана) и глубину внедрения наконечника h_n (по окружности барабана). После смены рабочего органа рукоятку поворачивают, при этом лопастный наконечник вырезает в грунте цилиндр, а прибор фиксирует на диаграммной ленте горизонтального самописца сопротивление грунта срезу (вращательный момент M , отмечаемый вдоль оси барабана) и угол поворота крыльчатки β в грунте (деформацию грунта, отмечаемую по окружности барабана). С помощью тарировочных графиков в масштабных единицах показания прибора переводятся в действительные значения измеряемых величин.

Использование прибора ПКВ дает возможность определять прочность грунта в широком диапазоне - от слабых суглинков до плотных глин. Пределы измерения сопротивления

срезу можно изменять в 10 раз перестановкой горизонтальных динамометрических пружин, а пределы измерения сопротивления пенетрации - в 2-3 раза заменой вертикальной пружины. Испытания могут производиться с поверхности земли шурфа до глубины 0,5м, а с применением удлиняющих стержней - до глубины 4-5м. Испытания в полевых условиях производятся в несколько этапов с фиксированным расположением экспериментальных точек отдельно коническим и крыльчатым наконечниками.

Определение величины сцепления и угла внутреннего трения по результатам совмещенных испытаний грунтов выполняется в следующей последовательности. В скважину внедряется конический наконечник и определяется зависимость между глубиной его погружения и приложенной величиной вертикального усилия $h_H=f(P)$. Затем в скважину вводится крыльчатый наконечник на глубину 10-12см от забоя и проводится испытание на вращательный срез с выявлением зависимости между углом поворота наконечника и приложенной величиной вращательного момента $\beta=f(M)$. Определив величину удельного сопротивления внедрения R_i и удельного сцепления C_i , можно найти величину их соотношения K_ϕ . По установленной величине коэф-фициента пропорциональности K_ϕ и по графику находится величина угла внутреннего трения ϕ .

Первый этап - определение величин сцепления и угла внутреннего трения в естественном недеформированном взрывом грунте. Их определяют из забоя скважин диаметром 50мм, пробуриваемых в

массиве на фиксированных расстояниях от взрыва. После зондировочных испытаний скважины заполняются грунтом с послойным трамбованием.

Следующим этапом определяются искомые величины характеристики грунтов в уплотненной взрывом зоне. В описанном порядке вокруг эпицентра взрыва бурятся скважины с минимально возможным приближением к ранее использованным и затампонированным скважинам. Это делается с целью получения достоверных данных об изменении свойств грунтов в уплотненной зоне и сопоставления их с исходными (до взрыва) величинами. Параллельно с зондировочными испытаниями для сравнительного анализа с полевыми методами применяется эпизодическое шурфование с отбором монолитов и последующим определением сдвиговых характеристик грунта в лабораторных условиях.

Испытания грунтов на сдвиг производили на стационарной установке. Образцы отбирали в кольца-обоймы диаметром 290мм. Для проведения испытаний на одноплоскостной сдвиг монолит грунта (в кольце-обойме) помещали в прибор и предварительно обжимали вертикальной нагрузкой в течение 15мин.

Сдвиговые испытания проводили при вертикальных давлениях в 10,0;15,0; 20,0Н/см³. Горизонтальное усилие на нижнюю часть кольца-обоймы прикладывали ступенями по 0,75Н/см². Каждую ступень нагрузки выдерживали в течение 3 минут с фиксацией деформации сдвига через 1 мин.

Обработка результатов сдвиговых испытаний при определении предельных значений сопротивления грунта сдвигу выполнялась в соответствии со

стандартной методикой. Согласно этой методике результаты сдвиговых испытаний представляют в координатах «логарифм деформации сдвига ($\lg \Delta l$) - логарифм сдвигающего напряжения ($\lg \tau$)». На границе зависимости $\lg \Delta l = f \cdot \lg \tau$ отмечается точка перелома, ордината которой принимается за численное значение предельного сопротивления грунта сдвигу $\tau_{пр}$. В соответствии с обычной методикой $\tau_{пр}$ назначается по характерной точке перегиба графика $\Delta l = f(\tau)$. Однако в этом случае выбор точки в значительной степени зависит от субъективного фактора, в то время как по графику $\lg \Delta l = f(\lg \tau)$ определение предельного сопротивления сдвигу проводится строго однозначно.

Деформативные свойства грунтов исследовали с помощью жесткого круглого штампа площадью 2500 см^2 . Испытания производили в соответствии с ГОСТом. Измерение осадок штампа производили с помощью прогибомеров системы ЛИСИ с ценой деления $0,01 \text{ мм}$.

Погрешности измерений при проведении полевых экспериментов можно представить в виде двух групп: связанных с работой измерительно-регистрирующей аппаратуры (в данном случае ПКВ) и обусловленные непостоянством физико-механических свойств грунтов и схемой производства замеров. Суммарная относительная погрешность определяется суммой погрешностей: при тарировке динамометрических пружин, обусловленной точностью отсчета по тарировочному графику (до $0,5 \%$); при тарировке прибора, причины которой заключены в наличии трущихся частей, люфта и т.д. (до $2,5 \%$); при обработке диаграмм,

причины которой аналогичны первой (0,5 %); при производстве испытания, что зависит от личных качеств исследователя (до 2%). В итоге суммарная относительная погрешность измерения составляет не более 5,5%. Все использованные измерительные приборы были поверены в установленном порядке. Случайные ошибки измерения второй группы являются следствием непостоянства физико-механических свойств и неточности относительного размещения зондировочных скважин. Поэтому точность получения результатов оценивается на основании статистических методов контроля за степенью рассеяния изучаемых характеристик.

4.3 Статистическая обработка результатов пенетрационных испытаний грунтов

Для определения механических свойств грунтов применяют метод пенетрационных испытаний. В качестве характеристики пенетрационных испытаний используют удельное сопротивление пенетрации R , представляющее собой отношение исправленного значения усилия пенетрации $P-P_0$ к квадрату глубины погружения h^2_N конического наконечника в грунт.

Общей закономерностью грунтов является изменение значений показателей физико-механических свойств от точки к точке по горизонтали и по вертикали. Выделяют три типа инженерно-геологической изменчивости пород [103]:

- скачкообразная незакономерная, при которой не наблюдается закономерной связи с параметрами пространства;
- скачкообразная закономерная, при которой

наблюдается закономерная связь с параметрами пространства;

-функциональная изменчивость показателей физико-механических свойств пород.

При обработке экспериментальных данных, выявленных по апробированию пород с первым типом инженерно-геологической изменчивости, можно применять методы математической статистики.

Для вычисления среднеквадратичного отклонения σ в этом случае используют формулу:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (52)$$

где x_i - численное значение i -го определения;

\bar{x} - среднее арифметическое значение определений в данной совокупности;

n - число определений в совокупности.

При обработке экспериментальных данных, для которых характерна скачкообразная закономерная изменчивость, становится неправомерным вычисление среднеквадратичного отклонения отдельных определений механических свойств грунтов по формуле [52]. Такие результаты испытаний являются заведомо неоднородными, так как их изменчивость определяется не только случайными факторами, но она также зависит от таких решающих факторов, как условия формирования и вид материнской породы, которые обуславливают вещественный состав и структуру грунта в целом. В практике инженерно-геологических изысканий в этих случаях также необходимо знать величину σ и ϑ , например для оценки степени влияния

случайных геологических факторов на тесноту закономерной связи.

Под случайными геологическими факторами подразумевают те, которые определяют некоторой неизвестной закономерностью однородность отдельного слоя грунта по влажности, объемному весу скелета, по структуре отдельных частиц и др.

Для проведения статистического анализа результатов, относящихся ко второму типу изменчивости, потребуется предварительно разделять их на отдельные однородные совокупности. После этого для каждой такой совокупности однородных результатов становится возможным вычислить значение σ по формуле [52]. При известных для каждой совокупности однородных результатов σ и \bar{x} возможно установить осредненное значение \bar{x} . Однако такой прием выявления осредненного значения \bar{x} по абсолютным численным значениям характеристик слишком трудоемкий.

Для совместного анализа результатов испытаний и вычисления относительного осредненного значения среднеквадратичного отклонения σ_R предлагается использовать относительные значения показателей механических свойств грунтов

$$K_i = x_i / \bar{x} = R_i / R_{cp}.$$

Исследованиями установлено, что характерными значениями коэффициента вариации являются: 10-12% для суглинков; 14-18% для песков.

По результатам 25-30 пенетрационных испытаний, выполненных с помощью ручного пенетрометра на отдельных площадках (размером

1,2x1,2м) в шурфах, выявляли среднее арифметическое значение удельного сопротивления пенетрации R_{cp} . После этого вычисляли коэффициенты $K_R = R_i/R_{cp}$ и устанавливали значения $K_{мин} = R_{мин}/K_{cp}$, где $R_{мин}$ и $R_{маx}$ – крайние значения непрерывного ряда.

Если в совокупности результатов обнаруживали резко завышенные значения R , то их отбраковывали. Если значения $K_{мин}$ и $K_{маx}$ на всех опробованных в шурфе глубинах совпадали, результаты определений $K_R = R_i/R_{cp}$ по всем этим горизонтам испытаний объединяли.

Для такой совокупности результатов испытаний устанавливали одно относительное значение среднеквадратичного отклонения:

$$\sigma_R = \pm \sqrt{\frac{(K_R - \bar{K}_R)^2}{n-1}} \quad (53)$$

При этом абсолютное значение среднеквадратичного отклонения отдельного измерения:

$$\sigma = \sigma_R \cdot R_{cp} \quad (54)$$

В справедливости данного положения можно убедиться, если в уравнение (53) подставить значения $K_R = R_i/R_{cp}$ и $\bar{K}_R = R_{cp}/R_{cp}$ и затем вынести за знак радикала R_{cp} . В результате получим:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{(R_i - R_{cp})^2}{n-1}} \quad (55)$$

При проведении пенетрационных испытаний в лаборатории приходится оценивать степень сходимости удельных сопротивлений пенетрации, полученных по испытаниям цилиндрического образца с одной и противоположной стороны. В

качестве оценочного критерия в этом случае удобно использовать показатель степени различия результатов:

$$\eta = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{R_{\max} + R_{\min}} \cdot 100\% . \quad (56)$$

Покажем, что этот показатель представляет собой удвоенное или утроенное значение коэффициента вариации ϑ и может использоваться для оценки изменчивости механических характеристик грунтов на отдельной площадке испытаний. Для этого разделим числитель и знаменатель выражения (56) на $R_{\text{ср}}$ и заменим в числителе и знаменателе $R_{\min}/R_{\text{ср}}$ на $K_{R \min}$, а $R_{\max}/R_{\text{ср}}$ на $K_{R \max}$. Для условий больших выборок за предельное отклонение отдельных определений и механических характеристик принимают более жесткий критерий: $\pm 3 \cdot \sigma$. Для условий больших выборок $K_{R \max} = K_{R+3} \cdot \sigma$ и $K_{R \min} = K_{R-3} \cdot \sigma$, где $K_R = 1,0$.

После подстановки соответствующих значений $K_{R \max}$ и $K_{R \min}$ можно убедиться, что $\eta_R = 3 \cdot \sigma \cdot 100\%$.

Так как $\sigma_R = \sigma/R_{\text{ср}}$, а коэффициент вариации $\vartheta = \sigma/R_{\text{ср}} \cdot 100\%$, то выражение (56) можно преобразовать к такому окончательному виду:

$$\eta_R = \frac{K_{R \max} - K_{R \min}}{K_{R \max} + K_{R \min}} \cdot 100\% . \quad (57)$$

Для условий малых выборок $\eta_K = 2 \cdot \vartheta$, а по испытаниям отдельных образцов показатель степени различия результатов отождествляется с коэффициентом вариации ϑ .

Таким образом, с использованием относительных коэффициентов изменчивости механических характеристик грунтов становится возможным вычислять обобщенное значение

среднеквадратичного отклонения и коэффициента вариации. Такие значения могут быть установлены для отдельного шурфа, участка.

Используя выражение (57), можно получить значение коэффициента вариации по двум испытаниям, что значительно сокращает трудоемкость вычислительной работы при определении характеристик грунта.

4.4 Методика прогнозирования уплотнения грунтов при газовзрывном воздействии

Методы контроля качества уплотнения грунтов многочисленны и разнообразны, но они трудоемки, а в ряде случаев практически неосуществимы или малонадежны.

Наиболее надежный способ получения характеристик грунтов до и после уплотнения – это отбор образцов ненарушенной структуры из шурфов и скважин с последующим лабораторным их определением. В водонасыщенных грунтах, находящихся выше горизонта грунтовых вод, шурфы и скважины проходят до насыщения грунтов водой перед уплотнением взрывами и после осушения уплотненной толщи грунта. В связи с необходимостью осушения грунта такой контроль не является оперативным и практически не дает возможности доуплотнить какие-либо участки массива грунта в процессе ведения работ. Кроме того, отбор кольцами влажных образцов грунта приводит к искажению результатов, особенно в рыхлых грунтах.

Для оценки степени плотности сложения водонасыщенного грунта до и после уплотнения

необходимо определение его плотности скелета или коэффициента пористости. Все эти методы трудоемки, дороги, могут применяться только в отдельных местах и малопригодны для оперативного контроля уплотнения грунтов по всей площади.

Для практического и оперативного контроля уплотнения грунтов применяются различные косвенные методы определения плотности скелета грунта или степени его плотности. Одним из таких методов является методика прогноза уплотнения грунтов при газовзрывном воздействии по результатам их лабораторных испытаний. Методика основана на физических представлениях о процессе уплотнения грунтов в результате действия одиночных импульсов. Основой ее является положение, что величина последующего уплотнения грунта при полном разрушении его структуры определяется начальной плотностью сложения данного грунта и интенсивностью импульсного воздействия.

Замерив среднюю осадку S участка уплотнения и глубину уплотнения $h_{уп}$, зная среднее начальное значение коэффициента пористости e_H , пористости n_H или плотности скелета грунта ρ_H , можно в предположении равномерного уплотнения грунта по глубине слоя определить эти характеристики после уплотнения по зависимостям:

$$\begin{aligned} e_K &= e_H - S/h_{уп} (1 - e_H); n_K = (h_{уп} \cdot n_H - S)/(h_{уп} - S); \\ \rho_K &= h_{уп} \cdot \rho_H / (h_{уп} - S) \end{aligned} \quad (58)$$

Расчетная величина осадки определяется из зависимости (58) как:

$$S_p = h_{yn} \frac{e_H - e_p}{1 + e_H} = h_{yn} \frac{n_H - n_p}{1 - n_p} = h_{yn} \frac{\rho_p - \rho_H}{\rho_p}, \quad (59)$$

где e_p , p_p , ρ_p - характеристики грунта, требуемые после уплотнения.

Имея данные об осадках поверхности грунта и глубинных реперов при лабораторных испытаниях, необходимое число взрывов подбирается так, чтобы средняя осадка в пределах радиуса эффективного действия была равна требуемой по зависимости (59). Контролируя при производственном уплотнении осадку поверхности и глубинных реперов, можно добиться получения заданной средней величины степени плотности грунта.

Предложенную методику можно использовать для решения обратной задачи. Зная по результатам полевых испытаний осадку поверхности S и по смещению глубинных реперов глубину уплотнения $h_{уп}$, определим среднюю относительную осадку слоя $\delta = S/h_{уп}$. Затем проводятся лабораторные испытания взятых проб грунта на действие газозрывного воздействия и по полученному графику и значению δ определяется плотность скелета грунта. При этом следует учитывать, что имеющиеся в естественном грунте структурные связи между частицами могут несколько исказить (завысить) полученные таким образом характеристики плотности сложения грунта.

Контроль качества уплотнения выполняется путем геодезического наблюдения за осадкой поверхности уплотняемого участка грунта.

Для контроля уплотнения грунта по всей площади участка устанавливается ряд реперов на различной глубине, которые нивелируются до и после взрыва. Число реперов следует устанавливать

в зависимости от требуемой точности наблюдений.

Глубину и равномерность проработки толщи грунта взрывом можно оценить по результатам замеров осадок глубинных реперов. При установке глубинных марок следует стремиться к их максимальному облегчению.

Простейшие марки могут быть изготовлены в виде вертикальных стержней из обрезков арматуры диаметром 6-8мм. На нижнем конце стержня обычно привариваются листы тонкого металла. Глубинная марка погружается в пробуренную скважину, а обсадная труба затем выдергивается.

Нивелировку поверхности следует начинать по окончании уплотнения и отжатия воды. Контрольную нивелировку следует выполнять не ранее, чем через 6-10 часов после взрыва. Опорные реперы при проведении нивелировки должны быть вынесены далеко за пределы зоны уплотняющего действия взрыва.

Лабораторные испытания производились следующим образом. Монолит грунта, взятый с площадки проведения взрыва, помещали в металлический стакан высотой 10мм. Масса грунта фиксировалась, и по известному объему сосуда определялась начальная плотность скелета грунта. Стакан с грунтом помещался в взрывную камеру и подвергался импульсному воздействию различного уровня нагружения. Осадку грунта относительно сосуда измеряли с помощью микрометра. Результаты лабораторных испытаний по определению плотности скелета грунта в зависимости от осадки поверхности при действии газозрывной нагрузки приведены в таблице 4.

Таблица 4
 Определение плотности скелета грунта в зависимости от осадки и уровня нагружения.

№ п/п	Уровень нагружения ΔP , МПа	Осадка S , мм	Плотность скелета грунта, г/см ³		
			До взрыва	После взрыва	Стандартным способом
1	2	3	4	5	6
1	0,210	1,2	1,650	1,670	1,665
2	0,220	1,3	1,653	1,675	1,670
3	0,205	1,1	1,648	1,667	1,660
4	0,220	1,1	1,654	1,673	1,668
5	0,405	2,9	1,650	1,700	1,690
6	0,409	4,4	1,645	1,720	1,710
7	0,420	3,1	1,655	1,690	1,680
8	0,410	2,7	1,640	1,658	1,685
9	0,605	5,2	1,650	1,740	1,740
10	0,610	5,5	1,640	1,735	1,730
11	0,620	5,8	1,630	1,730	1,720
12	0,614	5,5	1,625	1,720	1,710
13	0,810	7,8	1,650	1,790	1,780
14	0,820	9,0	1,625	1,780	1,770
15	0,85	8,4	1,640	1,790	1,785
16	0,89	7,6	1,650	1,780	1,780

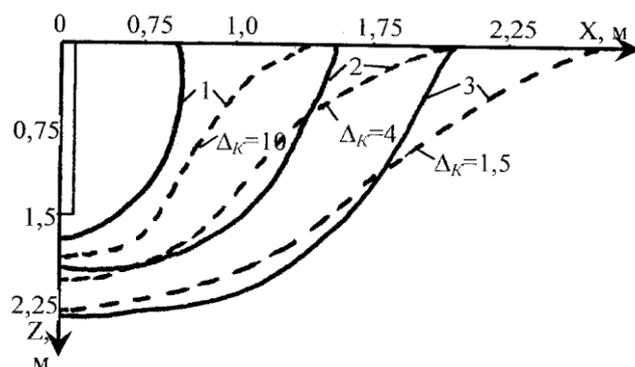
Примечание: Плотность скелета грунта в п.5 настоящей таблицы определяется по формуле (58).

Анализ лабораторных испытаний, представленных в таблице 4, показывает, что плотность скелета грунта, определяемая по описанной методике, хорошо согласуется с плотностью, которая определяется стандартным способом.

4.5 Определение зон деформаций грунта при газовзрывном воздействии

С целью определения зон уплотнения и деформаций грунта вокруг каждой скважины устанавливали глубинные марки на разной глубине (до проведения взрыва). Марки представляли собой конус диаметром 70мм и длиной 120мм, к которому на резьбе крепили стержень диаметром 6мм.

Для предохранения стержня, идущего от марки к поверхности, от воздействия окружающего грунта, его погружали в обсадной трубе диаметром 38мм. После погружения марки, обсадная труба поднималась с таким расчетом, чтобы от ее нижней плоскости до марки было расстояние не менее 150мм. Размещение марок в плане и в продольном разрезе показано на рисунке 27. Марки погружали виброметодом при помощи инвентарной толстостенной трубы диаметром 60мм, опертой на марку. После погружения марки эта труба извлекалась из грунта. О деформациях, развивающихся в массиве грунта вокруг скважины после взрывного воздействия, можно судить по перемещению марок. Одни марки перемещались, а другие, не попавшие в пределы зоны деформации, остались неподвижными. На рисунке 28 представлена зона деформации грунта при взрыве горючей смеси в скважине.



1- зона больших деформаций; 2 - зона средних деформаций; 3- зона малых деформаций;
 - экспериментальные данные;
 - теоретические данные.

Рисунок 28. Зона деформации грунта при взрыве горючей смеси в скважине

Теоретические результаты определения зон деформаций при взрывном воздействии на грунтовый массив получены при расчете по формулам (45-48) при следующих данных:

1 - зона больших деформаций $\Delta_{\kappa} = 10$, $\gamma_{\text{гр}} = 2,0$ г/см³, $R=0,75$ м, $\rho_{\text{max}} = 0,4$ МПа, $z_{\text{max}} = 2,0$ м

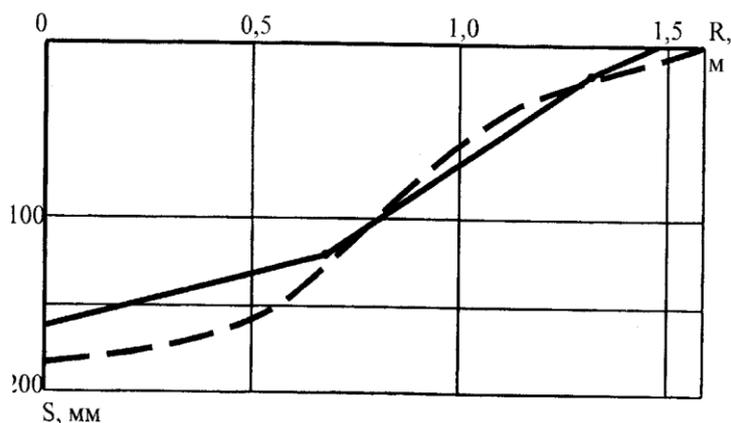
2 - зона средних деформаций - $\Delta_{\kappa} = 4$, $\gamma_{\text{гр}} = 0,2$ г/см³, $R = 1,10$ м, $\rho_{\text{max}} = 0,2$ МПа, $z_{\text{max}} = 2,2$ м.

3 - зона малых деформаций - $\Delta_{\kappa} = 1,5$, $\gamma_{\text{гр}} = 2,0$ г/см³, $R=1,70$ м, $\rho_{\text{max}} = 0,1$ МПа, $z_{\text{max}} = 2,45$ м.

Расхождение между экспериментальными величинами и теоретическими составляет: на глубине от 0 до 0,6 м - 35-65%; на глубине более 0,75 м - 10-16%.

На рисунке 29 показаны графики осадки поверхности грунта после проведения взрыва. Из рисунка 29 видно, что затухание осадки в опытных

данных по сравнению с расчетом происходит более интенсивно, особенно на расстояниях от 1 до 1,5 м.



----- - эксперимент; - - - -теория

Рисунок 29. Осадка поверхности грунта после взрыва

Таким образом, анализ сравнения опытных и расчетных зависимостей показывает, что зоны деформаций грунта после взрыва и осадку поверхности грунта можно определять по показаниям глубинных реперов.

4.6 Инженерно-геологические условия площадки для проведения полевых испытаний

Полевые испытания по уплотнению грунта взрывными воздействиями проводились на полигоне, расположенном на расстоянии 5-6 км севернее г. Караганды. В геологическом строении площадки принимают участие осадочные четвертичные и третичные отложения.

Породы четвертичного возраста представлены суглинками, песками, щебеночно-галечными обра-

зованиями мощностью 0,5-6,5м.

Суглинки в основном состоят из разновидностей желто-бурого и светло-коричневого цвета. Чаще всего в них содержатся карбонаты в виде мелких зернистых включений или крупных гнезд, заполненные светлой рыхлой пылеватой массой. Изредка встречаются вкрапления гипса.

В суглинках в переменном количестве (иногда до 40%) присутствует щебенка коренных пород - альбитофиров, неравномерно распределенная в толще грунта. В некоторых случаях верхняя часть толщи суглинков характеризуется сильно пылеватой массой, весьма сходной с лессовидными образованиями.

Включения щебенки в толще суглинков встречаются не только в виде отдельных обломков. Нередко они скапливаются в линзы и прослойки, в которых остроугольно-обломочный плохо окатанный материал цементируется тем же суглинком. Мощность линз и прослоек в толще суглинков варьируется в широких пределах - от 0,30 - 0,35 до 2,55 - 2,80м.

Прослойки щебня залегают как в самой толще суглинков, так и нередко в ее основании. В последнем случае прослойки щебня отделяют суглинки от подстилающих их третичных красно-бурых глин.

Описанные прослои и линзы щебня служат коллекторами для атмосферных вод, проникающих в них сквозь залегающие в кровле пески и суглинки.

В верхних горизонтах толщи суглинков обнаружены линзы и пропластки песков, имеющих серовато-желтую, ржаво-бурую, темно-желтую окраску. Гранулометрически они представлены

всеми разновидностями - от мелкозернистых глинистых до разнозернистых песков с преобладанием округлой крупнозернистой фракции. Все пески в значительном количестве - примесь гравия, нередко в них встречаются плохо окатанные частицы гальки. Часты гнезда супеси. Линзы песка залегают на глубине 1,0 - 1,7м от дневной поверхности. Мощность песков колеблется от 0,30 до 1,60м

В гидрогеологическом отношении площадка характеризуется присутствием довольно постоянного во времени горизонта подземных вод. Источником его питания являются атмосферные осадки, их инфильтрации вглубь благоприятствуют некоторые особенности рельефа площадки.

Исследования по определению физико-механических свойств грунтов (плотности, влажности и сопротивления грунта вращательному срезу) осуществлялись с помощью стандартных приборов полевой лаборатории из пробуриваемых предварительно скважин диаметром 50мм.

Методика проведения исследования состояла в следующем.

1. С использованием указанной аппаратуры определялись требуемые характеристики грунта до предполагаемой глубины уплотнения грунта естественного сложения до проведения взрывных работ. Частота замера по глубине составляла 0,3м. Число зондировочных скважин на фиксированном пикете не менее двух. Минимальное расстояние между скважинами 0,5м.

2. Определение характеристики того же грунта после проведения взрывных работ.

3. После проведения комплекса исследований

скважины тампонировались для сохранения их до повторных замеров с целью определения изменения свойств во времени. Сопротивление грунтов вращательному срезу определялось из скважин, пробуренных в непосредственной близости от предыдущих.

Результаты исследований по определению физико-механических свойств грунтов приведены в таблице 5. Анализ определения физико-механических свойств суглинка показывает, что плотность грунта естественного сложения изменяется без учета верхнего почвенного слоя в диапазоне 1,82 - 2,06 г/см³, причем можно отметить некоторое ее увеличение по глубине.

Величина объемной влажности возрастает с глубиной и на отметке 2,5-3,2м от поверхности достигает 30%. Сопротивление вращательному срезу изменяется в незначительном диапазоне от 0,015 до 0,025 МПа, а угол внутреннего трения варьируется в пределах от 17,8° до 25,1°.

Таблица 5

Физико-механические свойства грунтов естественного сложения

№ п/п	Плотность грунта ρ , г/см ³	Влажность ω , %	Сопротивление вращательному срезу F , МПа 10^{-1}	Крутящий момент, МН·м	Удельное сцепление C , МПа 10^{-1}	Угол внутреннего трения φ , град.
1	2	3	4	5	6	7
1	2,04	17,8	0,42	0,127	0,18	19,1
2	2,06	24,6	0,58	0,177	0,25	17,8
3	2,01	30,0	0,49	0,134	0,19	19,7

продолжение таблицы 5

1	2	3	4	5	6	7
4	1,91	29,0	0,58	0,162	0,23	18,4
5	1,82	21,7	0,61	0,120	0,17	23,3
6	1,94	25,7	0,75	0,127	0,18	25,1
7	2,06	26,0	0,65	0,128	0,18	25,0
8	2,02	24,5	0,61	0,124	0,173	23,0
9	2,03	22,0	0,69	0,127	0,18	23,6
10	2,01	21,2	0,64	0,140	0,20	24,1
11	1,86	23,5	0,70	0,126	0,19	22,8
12	1,95	21,4	0,60	0,122	0,168	23,3
13	2,04	19,3	0,55	0,131	0,210	19,4
14	2,02	20,0	0,48	0,129	0,151	20,4

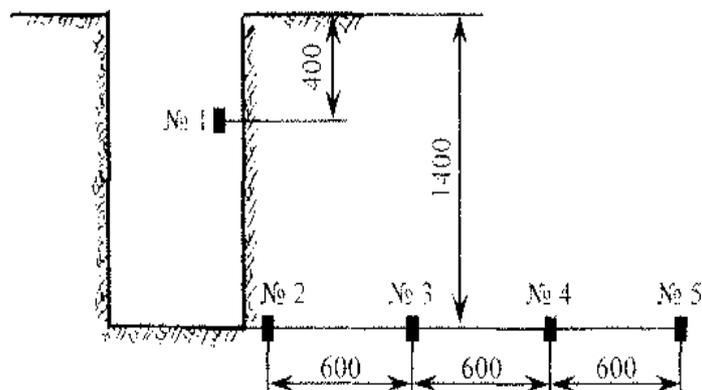
Суглинки, расположенные непосредственно в основании скважины, имели следующие свойства: плотность твердых частиц $\rho_s = 2,7 \text{ г/см}^3$, пластичность $I_L = 12,0\%$, текучесть $I_p = 0,42$, модуль деформации $E = 11,8 \text{ МПа}$, коэффициент пористости $e = 0,62$. Из общего объема частиц 51 % имели размеры 0,005мм и менее; 38,2% - 0,05-0,005мм; 10% - 0,5-0,05мм.

Плотность скелета грунта до глубины 6,0м колеблется в пределах 1,60 - 1,65 г/см^3 .

4.7 Формирование полей напряжений и зоны уплотнения при газовзрывном воздействии

Поскольку целью исследований было дальнейшее развитие представлений о волновых процессах в грунтах при газовзрывном воздействии, исследование полей напряжений является первостепенной задачей. Для определения давления в грунте, возникающего в результате уплотнения,

использовались датчики давления ДМИ. Перед проведением каждого опыта датчики закладывали в увлажненный грунт путем гидроподмыва, что обеспечивало хорошее их обжатие и точную запись. Схема расположения датчиков показана на рисунке 30.



1, 2, 3, 4, 5 - номера датчиков давления

Рисунок 30. Схема расположения датчиков давления ДМИ

На рисунке 31 представлены выкопировки осциллограмм давления непосредственно в скважине и непосредственно в грунте.

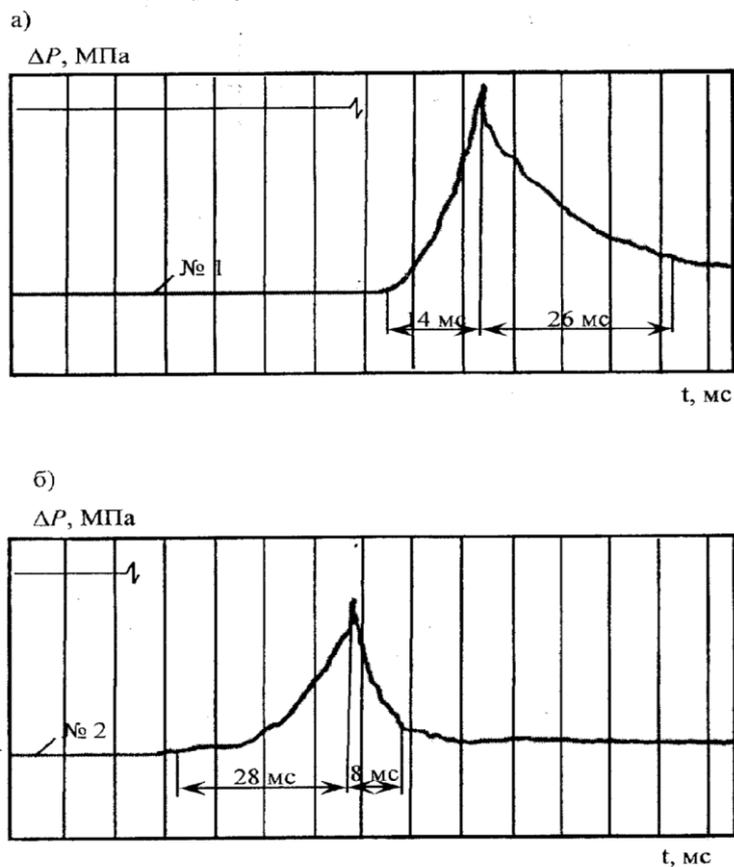


Рисунок 31. Осциллограммы давление-время при газовзрывном воздействии:
а) в объеме камеры; б) в грунте

По мере удаления от скважины ударная волна вырождается и превращается в волну сжатия с постепенным нарастанием и спадом давления. Происходит размывание эпюры волны напряжений с удалением от очага возмущения, изменение скорости приложения нагрузки вследствие вязкости грунта.

На рисунке 32 показан график изменения давления в грунте в зависимости от расстояния от эпицентра взрыва.

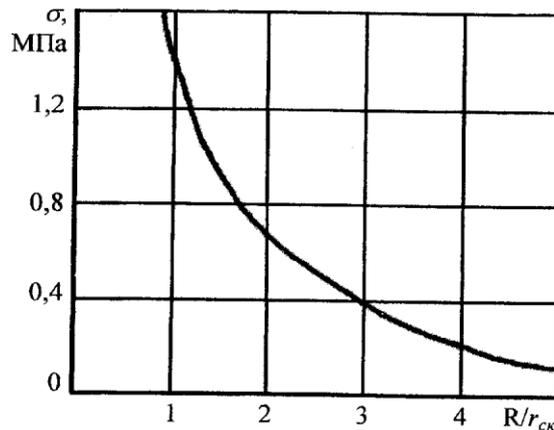


Рисунок 32. Изменение давления в грунте в зависимости от расстояния

Из анализа обработки экспериментальных данных получено следующее выражение по определению давления в грунте в зависимости от расстояния:

$$\sigma = K_{\sigma} \cdot R_0^{-\mu_{\sigma}}, \quad (60)$$

где $R_0 = R/r_{ск}$ - безразмерное расстояние;

$r_{ск}$ - радиус скважины;

K_{σ} и μ_{σ} - экспериментальные коэффициенты.

В экспериментальных исследованиях были определены объемные деформации суглинка. При описании объемных деформаций на основе экспериментальных параметров фронта волн напряжений использована зависимость [64]:

$$\theta = \frac{\sigma_{\max}}{\rho_r \cdot D_{\max}^2}, \quad (61)$$

где $\sigma_{\max} = 1,695$ МПа – максимальное давление в скважине при детонационном горении горючей смеси;

$\rho_r = 2,05$ г/см³ - плотность грунта;

$D_{\max} = 220$ м/с - скорость распространения взрывной волны в грунте.

Полученные таким образом деформации представляют собой сумму упругих и пластических деформаций, имеющих место на фронте волны.

Закон изменения объемных деформаций с расстоянием от взрыва записывается в виде степенной функции [64]:

$$\theta = K_{\theta} \cdot R_0^{-\mu_{\theta}} \quad (62)$$

Коэффициент K_{θ} и показатель степени μ_{θ} также определяются на основании экспериментальных данных.

В таблице 6 представлены экспериментальные данные по определению параметров зоны уплотнения грунтового массива при газовзрывном воздействии.

Таблица 6.

Определение параметров зоны уплотнения грунтового массива

№ п/п	Влажность, %	Поля напряжений		Поля деформаций		θ при напряжениях, МПа				
		K_{σ}	μ_{σ}	K_{θ}	μ_{θ}	1,6	1,0	0,5	0,2	0,1
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	20,0	1,61	1,32	0,12	2,02	0,15	0,07	0,03	0,007	0,003
2	21,7	1,69	1,30	0,15	2,0	0,14	0,06	0,03	0,007	0,004
3	26,0	1,68	1,4	0,08	1,96	0,08	0,04	0,02	0,005	0,002
4	29,0	1,50	1,53	0,11	2,11	0,10	0,07	0,03	0,006	0,003
5	21,3	1,72	1,25	0,12	1,80	0,12	0,08	0,04	0,003	0,002
6	21,0	1,70	1,23	0,11	1,79	0,10	0,07	0,04	0,002	0,001
7	32,3	1,48	1,63	0,10	2,10	0,06	0,04	0,02	0,009	0,003

Исследования для определения оптимальных условий ведения взрывных работ, и, в частности, оптимальной влажности, проводились в суглинистых грунтах грунтового массива ненарушенной структуры с влажностью $\omega = 18-32\%$. В таблице 6 приведены наряду с грунтовыми характеристиками экспериментальные коэффициенты зависимостей, определяющие характер изменения полей напряжений и остаточных объемных деформаций в зоне неполной ликвидации свободной пористости. Первоначальная плотность грунта составляет 1,62-1,65 г/см³. Как следует из экспериментальных данных, значение оптимальной влажности $\omega_{\text{опт}}$ колеблется в исследованном диапазоне в пределах от 20 до 23,5%, причем оно растет с увеличением плотности скелета грунта.

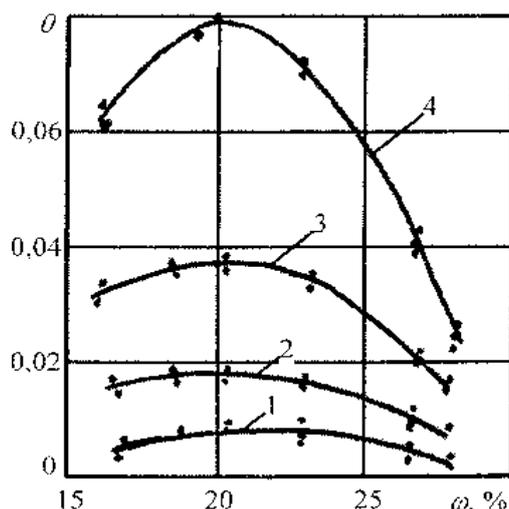
С учетом приведенных выше результатов разработана технологическая схема уплотнения грунтов. Для того, чтобы максимально уплотнить грунт, необходимо предварительно определить в конкретных условиях оптимальную влажность и произвести замачивание грунтового массива до соответствующего значения влажности.

Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что влажность грунта является эффективным регулятором его деформативности и ее направленное изменение можно рассматривать как один из методов

управления уплотнением грунтового массива энергией взрыва.

В ближней зоне процесс деформирования грунта происходит под действием квазистатического давления продуктов детонации. В дальней зоне процесс деформирования грунта происходит под действием слабых взрывных волн. При затухании взрывной волны с удалением от эпицентра взрыва, согласно экспериментальным данным, не только снижаются максимальные напряжения, но и возрастает скорость. Таким образом, при постоянном исходном значении плотности скелета грунта в деформируемом взрывом грунтовым массиве значение оптимальной влажности не может быть постоянным и, следовательно, на каждом заданном расстоянии от очага взрыва должна существовать определенная, присущая данному режиму и уровню нагружения оптимальная влажность.

Используя данные таблицы 6, определим значения остаточных объемных деформаций при различных фиксированных уровнях напряжений и, соответственно, скоростях их нарастания. По данным таблицы 6 построены зависимости $\theta(\omega)$ (рисунок 33) для постоянных уровней напряжений: $\sigma=1,6; 1,0; 0,5; 0,2; 0,1$ МПа. Общий характер кривых $\theta(\omega)$, а также изменения оптимальных значений ω с ростом уровня нагружений соответствует данным статических испытаний грунтов.



1-0,1МПа; 2 - 0,2 МПа; 3 - 0,5МПа; 4 - 1,0 МПа

Рисунок 33. Зависимости объемных деформаций грунта от влажности и уровня нагружения

При этом показательно, что интегральное значение оптимальной влажности находится в зоне действия взрывной волны со сравнительно невысокими силовыми параметрами. Вместе с тем, обращает на себя внимание тот факт, что со снижением уровня напряжений до 0,1-0,2 МПа зависимости $\theta(\omega)$ заметно выполаживаются, что свидетельствует о незначительном влиянии изменения влажности грунта на значение предельной объемной деформации при заданном уровне напряжений.

Отсюда следует, что возможности оптимизации условий взрывания при управлении эффектом взрыва путем увлажнения грунтового массива практически ограничиваются ближней зоной. В дальней зоне, т.е. в зоне малых напряжений, на уровне структурной прочности грунта доведение влажности до оптимальных значений нецелесообразно, особенно

если учесть немалые сложности в осуществлении таких работ применительно к дальней зоне.

При одинаковой мощности зарядов область малых напряжений на фронте взрывной волны и, соответственно, дальняя зона могут быть сокращены или расширены при замачивании в зависимости от технологического назначения взрыва. Если уплотнение грунтового массива производится в результате обработки массива в ближней зоне, параметры дальней зоны следует максимально сократить с тем, чтобы уменьшить противифльтрационный эффект в окружающей зоне. Поэтому замачивание блока должно производиться до оптимальных значений влажности. В то же время окружающие грунты замачивать нежелательно, что объясняется повышенным затуханием взрывной волны в сухом грунте. Следовательно, взрыв по данной схеме должен быть произведен сразу. Если взрыв будет произведен с опозданием, влага распространится в соседние с блоком грунты, эффективность взрыва возрастет в нежелательном направлении.

Для определения прочностных характеристик в зоне действия взрыва, выявления характера их изменения на различных расстояниях от эпицентра взрыва и сравнения с данными лабораторных экспериментов были обработаны результаты полевых натурных исследований.

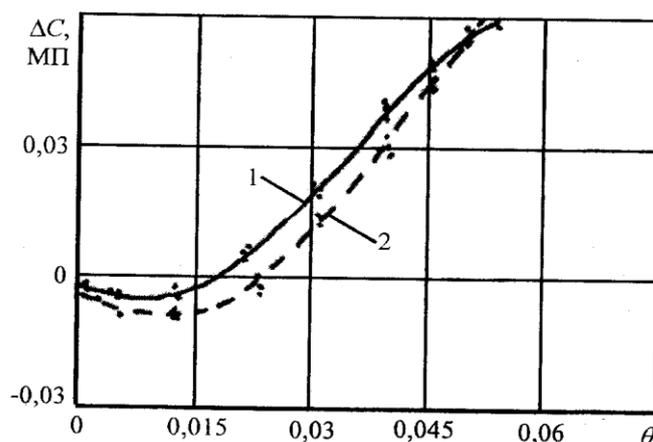
Проведению натурных исследований предшествовали экспериментальные работы для количественного сравнения прочностных характеристик грунтов естественного, недеформированного состояния, определенных с использованием полевых экспресс-методов в массиве и полученных при стандартных лабораторных испытаниях образцов,

отобранных из монолитов, с использованием сдвиговых приборов. Как показал анализ этих результатов, величины сопротивления грунтов вращательному срезу, как правило, на 5-10% меньше характеристик сцепления, определенных по стандартным методикам. Расхождение в величинах: угла внутреннего трения составляет 1-4°, причем большие величины также получаются при использовании сдвиговых приборов. Однозначность полученного расхождения получила подтверждение и послужила основанием для использования выбранных полевых методов для определения искомых характеристик, поскольку достоверность результатов гарантируется возможностью учета этой систематической ошибки.

Величина сцепления грунтов в непосредственной близости от пробуренной скважины возрастает по сравнению с той, которую имел грунт в естественном недеформированном состоянии в 1,6-1,9 раза.

По результатам измерения полевыми методами плотности грунта в уплотненной взрывом зоне установлен характер изменения объемной деформации грунтов θ с расстоянием от центра взрыва.

При сопоставлении результатов исследований по изменению сцепления и объемной деформации грунтов в уплотненной взрывом зоне на фиксированных расстояниях от центра взрыва видно, что прирост сцепления возрастает с увеличением деформаций (рисунок 34).



1 - лабораторные исследования;
2 – натурные исследования.

Рисунок 34. Зависимость прироста сцепления от объемной деформации

Однако в точках массива с малыми деформациями грунт теряет связность, разупрочняется, что подтверждается результатами лабораторных исследований. Как видно из рисунка 34, результаты натурных и лабораторных экспериментов совпадают с точностью 10-15%.

Можно предположить, что значительные деформации приводят к разрушению цементационно-кристаллизационных связей без заметной переупаковки и сближения частиц грунта, а это определяет уменьшение величины сцепления. С ростом деформаций (ближняя зона) происходит переупаковка скелета и уменьшение пористости, расстояние между частицами уменьшается и сцепление возрастает в результате увеличения связей между частицами, доленое участие которых в формировании общей величины связности в данном случае может являться определяющим.

Угол внутреннего трения грунта в уплотненной зоне также изменяется: у контура скважины его величина возрастает на 1,5-2,5°. С увеличением расстояния от центра взрыва величина φ убывает до первоначальных значений, причем размеры зоны изменения угла трения значительно меньше размеров зон изменения сцепления.

В таблице 7 приведены результаты экспериментов по изменению плотности скелета грунта после уплотнения в зависимости от расстояния R от эпицентра взрыва.

Из таблицы 7 видно, что плотность скелета грунта возросла с 1,64 до 1,83 г/см³ в зоне диаметром до 2,8м и на глубину до 2,4м.

Таблица 7.

Изменение плотности скелета грунта в зоне уплотнения

Глубина, Н, м	Плотность скелета грунта $P_{ск}$, г/см ³ при R , м								
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,2	1,78	1,77	1,70	1,72	1,71	1,75	1,76	1,69	1,66
0,4	1,80	1,77	1,81	1,75	1,70	1,71	1,70	1,72	1,65
0,6	1,81	1,82	1,83	1,74	1,72	1,70	1,69	1,71	1,67
0,8	1,82	1,83	1,82	1,78	1,73	1,72	1,72	1,70	1,64
1,0	1,83	1,82	1,80	1,77	1,74	1,70	1,71	1,66	1,65
1,2	1,79	1,78	1,76	1,75	1,76	1,78	1,73	1,68	1,64
1,4	1,78	1,76	1,78	1,77	1,80	1,78	1,75	1,72	1,65
1,6	1,78	1,77	1,79	1,78	1,81	1,78	1,74	1,71	1,64
1,8	1,75	1,74	1,76	1,75	1,74	1,72	1,69	1,66	1,64
2,0	1,67	1,66	1,66	1,67	1,67	1,65	1,66	1,64	1,64

На рисунке 35 представлены зависимости между избыточным давлением ΔP , расстоянием R от центра взрыва, объемом уплотненной зоны V и плотностью

скелета грунта $\rho_{ск}$.

График на рисунке 35-а $\Delta P=f(R)$ показывает падение давления по радиусу. График имеет вид гиперболы. С возрастанием избыточного давления в скважине увеличивается объем уплотненной зоны грунта. Объем зоны уплотнения в зависимости от радиуса R подсчитывается на границе уплотненной зоны ($\rho_{ск} = 1,64 \text{ г/см}^3$). При нагрузках, больше предела упругости, в грунте развиваются остаточные деформации.

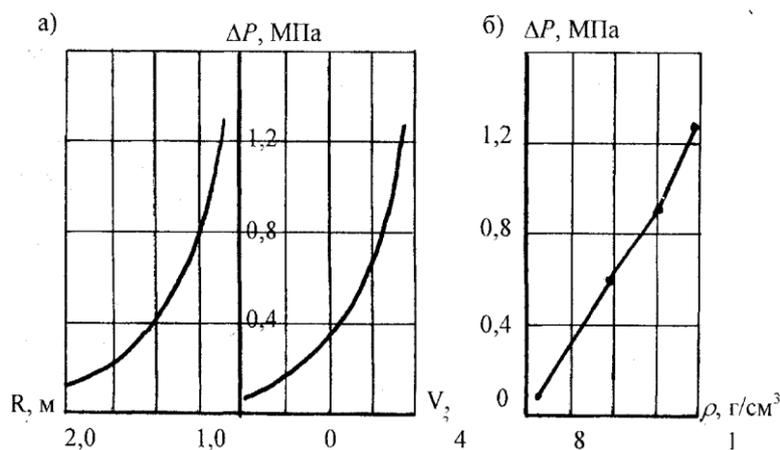


Рисунок 35. Экспериментальные зависимости по уплотнению грунта

График на рисунке 35-б показывает зависимость между избыточным давлением в скважине и плотностью скелета грунта. На участке при давлении от 1 до 8,3 атм имеем линейную зависимость.

Для определения зависимости спектра динамического воздействия от соотношения пропана и кислорода в смеси были проведены опыты для различных случаев в интервале 1/7-1/2 «пропан-кислород». Фронт давления достигает максимума при соотношении «пропан-кислород» 1/3 - 1/5.

Частотный спектр воздействия при этом различен, что может быть использовано для оптимального уплотнения, когда большая часть энергии взрыва идет на изменение структуры уплотняемого массива грунта.

Основные закономерности уплотнения связных грунтов, выявленные с помощью лабораторных исследований, проверяли при уплотнении грунта в полевых условиях динамическими воздействиями. Результаты полевых исследований показали, что и в условиях ограниченной возможности бокового расширения наблюдаются зависимости, полученные в лабораторных условиях.

На рисунке 36 показаны графики зависимости весового объема скелета грунта суглинка от логарифма избыточного давления.

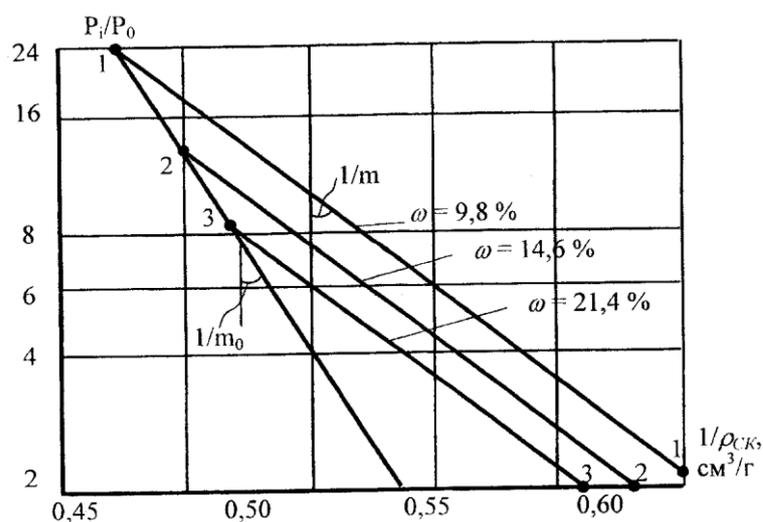


Рисунок 36. Графики результатов уплотнения суглинка при газовзрывном воздействии ($I/m_0 = 0,058 \text{ см}^3/\text{г}$, $I/m = 0,094 \text{ см}^3/\text{г}$)

Так, например, по номограмме (рисунок 36) нетрудно получить, что для уплотнения суглинка до весового объема скелета грунта $1/\delta = 0,544 \text{ см}^3/\text{г}$

($\delta = 1,836\text{г/см}^3$) при влажности $\omega = 14,6\%$ необходимо избыточное давление 0,8 МПа.

В целом можно констатировать, что метод динамического уплотнения связных грунтов позволяет устанавливать оптимальную влажность и максимальный объемный вес скелета грунта в выбранном или заданном диапазоне уплотняющих воздействий, проследить весь диапазон изменения весового объема скелета грунта от начального до минимально возможного, выявить диапазон эффективного уплотнения грунта с максимальной интенсивностью.

ГЛАВА 5. ПОВЫШЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ БУРОНАБИВНЫХ СВАЙ ЗА СЧЕТ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТА ГАЗОВЗРЫВНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

5.1 Рекомендации по практическому использованию газовзрывного метода уплотнения грунтов

В настоящее время все большее применение находит ряд методов уплотнения грунта, основанных на динамических воздействиях. Одним из наиболее эффективных и безопасных способов является предлагаемый нами метод газовзрывного уплотнения. В процессе работы экспериментальной установки нами было проведено около сотни взрывов, при этом не наблюдалось отказов в результате выхода из строя узлов и элементов, работающих в условиях повышенной влажности до 90% и температурном диапазоне от 5 до 35°C. Разброс давления в грунте вблизи скважины был в пределах 10-15%. Установка позволяла производить уплотнение не только лессовых и песчаных грунтов, но и суглинков.

Предлагаемая технология уплотнения грунта с помощью газовзрывного воздействия была использована при усилении фундаментов корпуса столовой Карагандинского Экономического Университета. Так как корпус столовой располагается в непосредственной близости от главного учебного корпуса, то в качестве основного варианта усиления существующих фундаментов было решено

использовать устройство буронабивных свай. При устройстве таких свай отсутствует вибрация и шум копра, а также минимальное воздействие на прилегающие фундаменты и конструкции существующих зданий.

Технология устройства буронабивных свай была следующая. С помощью специального оборудования бурились скважины диаметром 400мм на глубину 3,0м. Сверху скважины устанавливалась металлическая крышка, которая обеспечивала герметичность образованной полости в грунте. Компоненты газообразной взрывной смеси (5,5 % пропана + 15% кислорода) по соединительным рукавам из баллонов подавались в скважину. После заполнения скважины горючей смесью людей отводили в безопасное место и на электродетонатор с навеской 30г аммонита подавали напряжение от источника питания. Происходил взрыв и уплотнение грунта.

Процесс уплотнения грунта контролировали с помощью отбора монолитов грунта. Плотность грунта естественного уплотнения увеличивалась с 1,80 до 2,04 г/см³ в непосредственной близости от скважины.

Для определения избыточного давления в скважине использовали специальный датчик, который фиксировал лишь максимальное давление. Давление в скважине при проведении взрывов изменялось в пре-делах от 2,0 до 2,3 МПа.

По номограмме, представленной на рисунке 36, было установлено, что при уплотнении с

естественной влажностью $\omega=10,4\%$ газовзрывным воздействием при избыточном давлении в скважине 2,0МПа теоретическая плотность скелета грунта составит $2,05\text{г/см}^3$, а фактическая плотность оказалась равной $2,04\text{г/см}^3$.

После уплотнения грунта газовзрывным воздействием в скважину опускали арматурный каркас и заполняли ее бетоном. Для устройства буронабивных свай использовался тяжелый мелкозернистый бетон, который изготавливался непосредственно на строительной площадке в бетономешалке. С бетономешалки бетонная смесь подавалась в скважину. После полного заполнения скважины бетонной смесью производилось уплотнение бетона.

Бетонная смесь соответствовала требованиям ГОСТ 7473-94. Бетонная смесь состояла из портландцемента, песка, воды и пластификатора. Портландцемент соответствовал текущим стандартам ГОСТ 10178-85, марки 400 и выше. Пластификатор соответствовал ТУ 130231036-89. Вода использовалась питьевая, чистая и свободная от нефтепродуктов, кислоты, щелочей, солей в соответствии с ГОСТ 23733-79. Песок отвечал требованиям стандартов ГОСТ 8736-93.

В качестве рабочей арматуры использовался профильный стержень согласно ГОСТ 5781-82. Проверка бетонной смеси производилась испытанием шести кубиков для каждой сваи. Контрольные кубики выполнялись и испытывались в соответствии с ГОСТ 210180-90, ГОСТ 8462-85.

Фактическая 28-дневная прочность бетона буронабивных свай соответствовала классу В15.

Две буронабивные сваи испытывались статической нагрузкой согласно ГОСТ 5886-78 и СНиП 2.02.03-85 «Свайные фундаменты». Нагрузка, создаваемая гидродомкратом, прикладывалась ступенями по 100 кН. Несущая способность буронабивной при уплотнении грунта газовзрывным воздействием составила 1050 кН.

На той же площадке были изготовлены две буронабивные сваи диаметром 400мм и длиной 3,0м без уплотнения грунта. Испытания статической нагрузкой показали, что несущая способность таких свай составила 450 кН. Таким образом, несущая способность буронабивных свай, выполненных по предложенной технологии, по сравнению со сваями, выполненными по традиционной технологии, увеличилась в 2,3 раза.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что использование буронабивных свай с уплотнением грунта газовзрывным воздействием позволит снизить затраты на устройство за счет повышения несущей способности сваи минимум в два раза по сравнению с обычными.

Кроме того, области применения буронабивных свай с уплотнением грунта газовзрывным воздействием могут быть весьма обширны:

- новое строительство;
- строительство в непосредственной близости от существующих сооружений, фундаментов и внутри помещений;

- строительство в насыпных грунтах;
- для усиления фундаментов и при ликвидации аварий;
- строительство на намывных территориях;
- устройство противодиффузионных занавес.

5.2 Аварийные нагрузки, возникающие при устройстве буронабивных свай уплотнением грунтов газовзрывным воздействием

Взрывной импульс широко используется в строительстве. Применение метода уплотнения грунтов газовзрывным воздействием является весьма эффективным средством увеличения прочности оснований, а также уменьшения их деформируемости. Одним из способов увеличения несущей способности буронабивных свай является уплотнение грунта околоскважинного пространства с помощью газовзрывного воздействия.

Устройство таких буронабивных свай выполняется следующим образом. В пробуренную скважину диаметром 400мм и глубиной 3,0м устанавливалась навеска аммонита с электродетонатором. Сверху скважины устанавливалась стальная крышка или укладывалась полиэтиленовая пленка. Скважина заполнялась пропановоздушной смесью с добавкой кислорода. На электродетонатор подавалось напряжение и происходил взрыв горючей смеси. Часть горючих газов прорывалась наружу и происходило горение горючей смеси уже на открытой площадке.

При взрывном горении горючей смеси внутри скважины и на открытой площадке возникает ударная волна. В результате действия ударной волны на открытой площадке могут пострадать и расположенные поблизости промышленные и гражданские здания.

Отсутствие в специальной литературе данных по определению безопасных нагрузок на людей и строительные конструкции от действия ударной волны ставит перед проектировщиками определенные трудности в решении этого вопроса.

Законы распространения и параметры ударной волны в основном изучались для конденсированных взрывчатых веществ, для которых установлены основные зависимости давления на фронте ударной волны, импульса ударной волны, времени действия от веса заряда и расстояния.

При определении расстояний и расчете конструкций на действие такого кратковременного импульса необходимо иметь данные о продолжительности действия τ , максимальном давлении ΔP и величине импульса J ударной волны. В зависимости от того, какая из двух величин - ΔP или J - является наиболее опасной, расчет упругих систем ведется двумя различными методами.

Возникает необходимость учета соотношения между временем действия нагрузки и периодом собственных колебаний системы T . В случае $\tau/T > 2,5$ нагрузка определяется величиной избыточного давления: тогда время существования

избыточного давления в ударной волне τ не входит в характеристику импульсивной нагрузки. В течение этого времени сооружение деформируется и разрушается, а давление в ударной волне падает незначительно.

Если давление недостаточно и вызванная им деформация сооружения с самого начала и приведет к его разрушению, то сооружение не разрушится и в последующие моменты, когда давление в ударной волне начнет падать.

Если же отношение длительности фазы сжатия ударной волны к периоду собственных колебаний упругой системы меньше или равно 0,1, т.е. $\tau/T < 0,1$, то давление за фронтом ударной волны упадет за столь короткий промежуток времени, что сооружение практически не успеет сдвинуться с места. Однако под действием импульса сжатия сооружение приобретает некоторое количество движения и будет в дальнейшем разрушено, если это движение окажется достаточным, чтобы вызвать предельную деформацию. Разрушение в этом случае произойдет уже после того, как фаза сжатия ударной волны пройдет. Таким образом, если $\tau/T \leq 0,1$, то импульс можно считать мгновенным, а реакцию системы - зависящей только от величины импульса J .

При $0,1 < \tau/T < 2,5$ реакция системы будет зависеть от параметров волны, т.е. давления на фронте, продолжительности действия давления во времени, характера его изменения и величины импульса.

В таблице 8 приведены действительные периоды

собственных колебаний сооружений от действия ударных воли, возникающих при детонации газоздушных горячих смесей.

Таблица 8

Периоды собственных колебаний некоторых зданий и сооружений

Наименование зданий и сооружений	Период собственных колебаний T , сек
1	2
Двухэтажное кирпичное здание	0,14
Крупнопанельное здание (в зависимости от грунта)	0,22-0,32
Пятиэтажный производственный каркасный корпус	0,25
Трехэтажное кирпичное здание заводоуправления	0,33
Каркасное трехэтажное здание фабрики $H=17,5\text{м}$	0,85
Башенный копер шахты высотой 70м	0,20

Из таблицы 8 видно, что периоды собственных колебаний находятся в довольно широких пределах. Продолжительность действия ударных волн, возникающих при газозрывном уплотнении грунтов, по нашим исследованиям, составляет от 5

до 20 мс. Следовательно, нагрузка имеет импульсивный характер и при расчете строительных конструкций необходимо учитывать только величину удельного импульса.

Поэтому при выполнении полевых исследований по уплотнению грунтов газовзрывным воздействием проводилась запись диаграмм «давление-время» в зависимости от расстояния от эпицентра взрыва. Результаты, полученные на основе обработки опытных данных, представлены на рисунке 37.

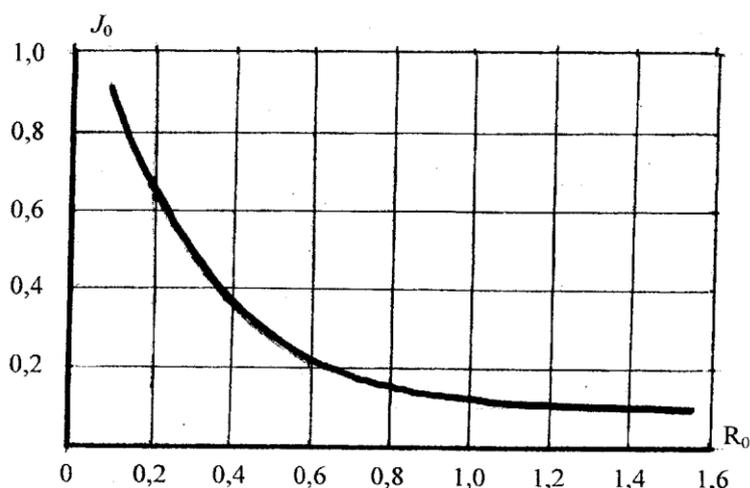


Рисунок 37 Зависимость импульса ударной волны от расстояния

Величины R_0 и J_0 определяются по формулам:

$$R_0 = R/E^{1/3}; J_0 = J/E^{1/3}; E_0 = \rho_0 \cdot g \cdot V; \int_0^{\tau} P(t) \cdot dt, \quad (63)$$

где R_0 - приведенное расстояние;
 R - расстояние от центра взрыва, м;
 E - энергия взрыва, Дж;
 g - удельная теплота взрыва, Дж/кг;
 ρ_0 - плотность ГВС, кг/м³;

V - объем ГВС, м³;

J_0 - приведенный импульс;

J - импульс фазы сжатия в проходящей ударной волне, Н·с/м².

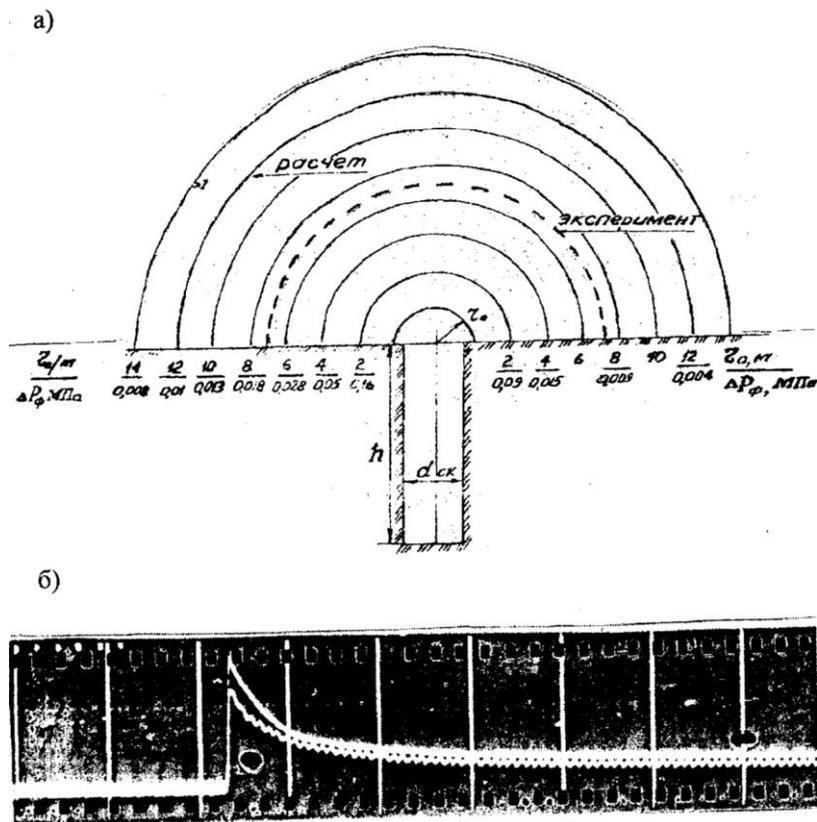
В настоящих исследованиях проводились взрывы объемов ГВС, расположенные на поверхности земли, где часть энергии расходуется на уплотнение грунта, а меньшая часть энергии (около 20-30%) идет на формирование полусферической ударной волны на открытой площадке (рисунок 38).

Анализ экспериментальных данных показывает, что зависимость $J = f(E, R)$ подчиняется закону энергетического подобия. Для импульса сжатия в проходящей ударной волне при детонации ГВС в воздухе получена следующая эмпирическая зависимость:

$$J=30,4 \cdot E^{2/3} /R \quad (64)$$

Данная зависимость аналогична формуле, полученной в работе [111], но разница в коэффициенте достигает 26%, что имеет существенное значение при определении нагрузок на строительные конструкции зданий и на людей.

При определении величины импульса, действующего на преграду, приближенно считают, что при нормальном отражении величина импульса удваивается по сравнению с импульсом в свободно проходящей ударной волне. Величина действующего на преграду импульса зависит от ее жесткости: чем жестче преграда, тем выше нагрузки на нее.



a) характер распределения давления относительно оси скважины;

б) осциллограмма «давление – время» при взрыве ГВС.

Рисунок 38. К определению безопасных расстояний при устройстве буронабивных свай газовзрывным воздействием

Характер разрушения элементов зданий зависит от нагрузки, создаваемой ударной волной. Общую оценку разрушений, вызванных ударной волной, принято давать по степени тяжести этих разрушений. Для большинства объектов, как правило, рассматривается три степени - слабое, среднее и сильное разрушение. В нашем случае интерес представляет слабое разрушение. В случае слабого

разрушения, как правило, объект не выходит из строя и его можно эксплуатировать немедленно или после незначительного ремонта.

Безопасные нормативы для боеприпасов и взрывчатых веществ [105] в определенной мере учитывают действие, которое оказывает ударная волна на здания и людей. Таким безопасным давлением является давление в ударной волне, не превышающее 10 кПа, а импульс - не более 150 Па·с. При действии ударной волны с такими параметрами человек не получит серьезных травм, а конструкции зданий - повреждений. При проведении газовзрывных работ при устройстве буронабивных свай люди должны находиться на расстоянии свыше 25,0м от эпицентра взрыва в специально отведенных местах.

5.3 Расчет несущей способности буронабивных свай при уплотнении грунта газовзрывным воздействием

Уплотнение грунта околоскважинного пространства в результате газовзрывного воздействия повышает несущую способность буронабивных по сравнению с обычными более чем в два раза.

Несущая способность таких буронабивных свай может определяться по формулам СНиП 2.02.03-85 «Свайные фундаменты» для буровых и набивных свай. Однако уплотнение грунта скважины в результате газовзрывного воздействия заставляет внести в эти формулы некоторые коррективы. Прежде всего вместо площади опирания сваи A и площади боковой поверхности ствола сваи и в формулу должны быть подставлены значения

площади условного фундамента и площади боковой поверхности условного фундамента, которые принимаются согласно рисунка 39. Кроме того, другие значения должны быть приданы коэффициентам условия работы и величинам сопротивления грунта по боковой поверхности и пятой буронабивной сваи с учетом образования уплотненной грунта.

Несущая способность F_d , кН, буронабивной сваи при уплотнении грунта газовзрывным воздействием, работающей на сжимающую нагрузку, определяется по формуле:

$$F_d = Y_c (Y_{CR} \cdot R \cdot A_{усл} + u_{усл} \cdot \sum Y_{cf} \cdot f_i \cdot h_i), \quad (65)$$

где Y_c - коэффициент условий работы сваи;

Y_{CR} - коэффициент условия работы грунта под нижним концом сваи;

R - расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи;

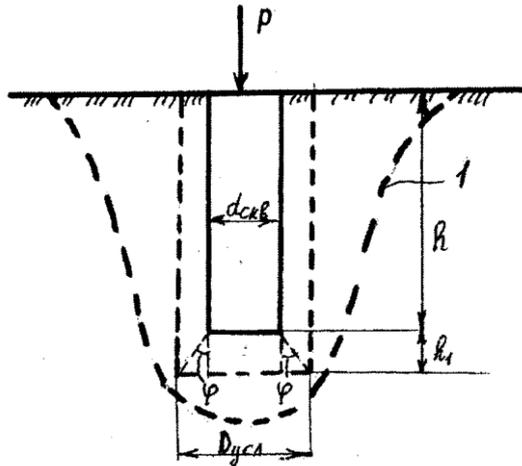
$A_{усл}$ - условная площадь опирания пяты сваи с учетом уплотненной зоны грунта, m^2 ;

$u_{усл}$ - периметр поперечного условного фундамента, м;

Y_{cf} - коэффициент условий работы грунта по боковой поверхности сваи;

f_i - расчетное сопротивление i -го слоя грунта по боковой поверхности ствола сваи, кПа;

h_i - толщина i -го слоя грунта, соприкасающегося с боковой поверхностью сваи, м.



1- уплотненная зона грунта

Рисунок 39. Определение условной площади опирания под пятой буронабивной сваи при уплотнении грунта газовзрывным воздействием

Все значения величин, входящих в формулу (65), определяются согласно СНиП 2.02.03-85 «Свайные фундаменты». Условная площадь опирания под пятой сваи определяется по формуле:

$$A_{усл} = \pi \cdot D_{усл}^2 / 4; D_{усл} = d_{скв} + 2 \cdot h_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi; h_1 = 0,5 \cdot d_{скв}, \quad (82)$$

где $d_{скв}$ – диаметр скважины при устройстве буронабивной сваи, м;

φ - угол внутреннего трения, град.

Расчет по деформациям одиночных буронабивных свай с уплотнением грунта газовзрывным воздействием определяется аналогично расчету осадок фундамента на естественном основании в соответствии с требованиями СНиП 2.02.01-85. При этом площадь подошвы этого условного фундамента принимается

равной $A_{\text{усл}}$ с глубиной заложения $H = h + h_1$.

5.4 Технико-экономическое обоснование применения буронабивных свай при уплотнении грунта газовзрывным воздействием

Для оценки технико-экономической эффективности применения буронабивных свай был произведен стоимостной расчет расхода материала, отнесенного к 10кН несущей способности сваи. Такому расчету подлежали буронабивные сваи диаметром 400мм, длиной 10, 15 и 20м и буронабивные сваи диаметром 800мм, длиной 20м.

Буронабивные сваи диаметром 400мм сравнивались с призматическими железобетонными сваями сечением 400х400 мм, длиной 10, 15 и 20м.

Принятые варианты грунтов:

I вариант - в основании песчаный гравелистый или глинистый грунт;

II вариант - в основании песок средней плотности или глина;

III вариант - однородные текучепластичные глины.

Определению основных технико-экономических показателей применения буронабивных с уплотнением грунта газовзрывным воздействием предшествовал расчет их несущей способности по грунту согласно СНиП 2.02.03-85.

Результаты расчета позволяют сделать следующие выводы. При увеличении диаметра буронабивной сваи ее удельная несущая способность уменьшается на 10%, когда прочность прорезаемого грунта приближается к прочности грунта в подошве сваи, и до 30%, когда прочность прорезаемого грунта

значительно меньше, чем грунта основания.

Следующим этапом в оценке технико-экономической эффективности применения буронабивных свай с уплотнением грунта было сравнение показателей расхода бетона и стали на 10кН несущей способности на буронабивные сваи вышеуказанных геометрических размеров.

Для грунтов по I и II вариантам расход бетона на буронабивные сваи лишь немногим больше, чем на забивные. Большее различие наблюдается в грунтах III варианта. Однако, этот случай не характерен для применения буронабивных свай, которые, как правило, доводятся до достаточно плотных грунтов.

При использовании буронабивных отпадает необходимость их армирования на всю длину для восприятия изгибающих моментов, возникающих при различных технологических операциях.

Для оценки расхода стали на армирование буронабивных свай проводилось сравнение различных способов устройства свайных фундаментов в промышленном и гражданском строительстве, в частности, для случая, когда армирование необходимо (для нашего случая расчета принимаем, что свая армируется на всю длину при расходе стали 90 кг/м^3). Расход стали для призматических свай сечением 400х400мм при длине 10 и 15м принимаем по типовым чертежам: при длине 10м 174 кг/м^3 , 15м - 228 кг/м^3 . Расход стали на 10 кН несущей способности приведен в таблице 9.

Из таблицы видно, что в зависимости от грунтовых условий применение буронабивных свай дает экономию стали: для свай длиной 10м - от 54 до 81%, 15м - от 32 до 90%. Для нехарактерного для буронабивных свай III варианта грунтов экономия

стали составляет 46-50%.

Учитывая, что большая часть буронабивных свай в гражданском строительстве будет использоваться с частичным по высоте армированием, размер экономии стали будет значительно большим.

На основе данных о расходе бетона было приведено определение стоимости 10кН несущей способности на забивные и буронабивные сваи при различных грунтовых условиях. Из таблицы видно, что замена забивных свай буронабивными позволит снизить стоимость свай для устройства фундаментов промышленных и гражданских зданий при длине 10 и 15м на 37-67%.

Таблица 9

Расчетные показатели для различных вариантов грунта

Вариант грунта	Тип свай	Расход бетона на 10кН несущей способности, м ³	Расход стали на 10кН несущей способности, кг	Стоимость 10кН несущей способности, тнг	Экономия от применения буронабивных свай по сравнению с забивными, %	
					L=10 м	L=15 м
1	2	3	4	5	6	7
I а	□ о	7,2/7,9 8,6/10, 0	12,2/15, 8 7,4/8,7	1850/2800 1700/1950	50	42
I б	□ о	11,3/1 4,7 11,5/1 5,7	19,2/27, 0 10,6/14, 2	3950/5150 2350/3100	67	67
II а	□ о	14,2/1 4,1 18,0/1 8,7	24,1/29, 2 16,7/16, 0	4950/4900 3500/3350	37	37

продолжение таблицы 9

1	2	3	4	5	6	7
Пб	□	26,3/2	44,7/59,	9200/1030	57	50
	о	8,9 29,0/3 3,8	0 26,8/31, 0	0 5850/6850		
Ш	□	55,5/5	94,0/11	18000/197	26	16
	о	6,5 71,5/8 3,0	3,0 64,0/75, 0	50 14800/171 00		

Примечание: □ - забивные призматические сваи сечением 400х400мм; о - буронабивные сваи диаметром 400мм. В числителе приводятся данные для свай длиной 10м, в знаменателе – для свай длиной до 15м.

Сравнение несущей способности забивной сваи сечением 400х400мм и длиной 15м с буронабивной сваей диаметром 400мм и длиной 15м показывает, что в среднем одна буронабивная свая в два раза экономичнее забивной. Стоимость изготовления двух забивных свай сечением 400х400 мм и длиной 15м составляет 79200 тенге. Стоимость изготовления буронабивной сваи диаметром 400мм и длиной 15м принимаем 47500 тенге.

При устройстве 100 свай в год ежегодная экономия составит 3170 тыс. тнг. Экономический эффект с учетом капиталовложений и производственных затрат будет равен:

$$\mathcal{E} = 317 - 0,12 \cdot (350 + 100) = 263 \text{ тыс. тнг.}$$

Следует отметить, что помимо денежной экономии использование буронабивных свай резко

снижает металлоемкость свайных фундаментов. Кроме того, благодаря простоте обеспечения точного соблюдения высотных отметок верха свай будут ликвидированы неизбежные потери железобетона при срезке забивных свай.

ГЛАВА 6. АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ГАЗОВЗРЫВНОГО МЕТОДА УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ

Оценка степени риска поражения людей и нанесения ущерба при аварийной ситуации при уплотнении грунта газовзрывным воздействием связана с задачей прогнозирования показателей надежности и остаточного ресурса функционирующей системы. Наиболее важным вопросом является установление допустимых сроков дальнейшей эксплуатации индивидуального объекта при конкретном риске аварии. Ответственность за соответствующие инженерные решения о мерах по снижению риска или о приостановке функционирования объекта лежит на комиссии, в состав которой должны входить специалисты-эксперты и представители административных органов.

Одним из основных показателей надежности объекта является вероятность $P(t)$ безотказной работы на некотором временном интервале или функция надежности. Функция $Q(t) = 1 - P(t)$, дополняющая $P(t)$ до единицы и характеризующая вероятность отказа, является функцией риска аварии - поражения людей и нанесение материального ущерба.

Для оценки риска применяют некоторые модели теории надежности. Среди них модели высоконадежных систем, для которых аварийные ситуации представляют редкие события, а также модели стареющих систем, качество которых в процессе эксплуатации ухудшается вследствие ползучести, различных видов усталости, износа и

других видов повреждений [106,107].

Прогнозирование аварийных ситуаций возможно на основе элементарной статистики и дискретного распределения Пуассона, часто применяемого к редким событиям.

6.1 Оценка риска аварий

Функцией риска аварии из-за отказа нормального функционирования объекта называют вероятность отказа:

$$H(t) = 1 - P(t), P(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(\xi) d\xi\right) \quad (67)$$

где $P(t)$ - вероятность работы (функция надежности);

$\lambda(t)$ - интенсивность отказов, равная вероятности того, что после безотказной работы до момента времени t авария произойдет в последующем малом отрезке времени.

Опыт показывает, что после небольшого начального периода эксплуатации (приработки) функция $\lambda(t)$ длительный период достаточно стабильна, т.е. $\lambda(t) = \text{const}$. Влияние интенсивного старения за счет коррозионного износа, усталости и других факторов должно исключаться регламентированием допустимого службы.

Принимая для периода нормального (спокойного) функционирования $\lambda(t) = \text{const}$, из (67) получаем экспоненциальное распределение:

$$P(t) = \exp(-\lambda \cdot t), \quad (68)$$

причем $\bar{t} = 1/\lambda$ - математическое ожидание срока

службы (ресурса) или средняя наработка на отказ. Функцию риска теперь может записать в виде:

$$H(t) = I - \exp\left(-t/\bar{\theta}\right) \quad (68)$$

При функции надежности в виде (69) частота отказов в системе однотипных объектов (поток случайных событий) соответствует дискретному распределению Пуассона

$$Q(N, \lambda\tau) = \frac{(\lambda\tau)^N}{N!} \cdot \exp(-\lambda\tau), N = 0, 1, 2, \dots, \lambda\tau > 0. \quad (69)$$

Согласно данной формуле, аварии на временном интервале τ ($t, t+\tau$) произойдут N раз с вероятностью $Q(N, \lambda\tau)$, а отсутствие аварийных ситуаций (отсутствие отказов) - с вероятностью:

$$Q(0, \lambda\tau) = \exp(-\lambda\tau) \quad (70)$$

Вероятность того, что аварии произойдут n раз при $n < N$ (т.е. менее N раз), определяется функцией распределения:

$$Q_0(n < N) = \sum_{i=0}^{N-1} Q(i, \lambda\tau) = 1 - \varphi(N, \lambda\tau), \quad (71)$$

$$\varphi(N, \lambda\tau) = Q_0(n \geq N) = \sum_{i=1}^{\infty} Q(i, \lambda\tau)$$

Вероятность \bar{Q} возникновения хотя бы одной аварии представляет оценку риска на объектах в период τ :

$$\bar{Q} = 1 - Q(0, \lambda\tau) = 1 - \exp(-\lambda\tau) \quad (72)$$

Для математического ожидания \hat{N} дисперсии D и стандарта (среднеквадратического отклонения) σ имеет место равенство $\hat{N} = D = \sigma^2 = \lambda\tau$, т.е. имеется возможность экспериментальной проверки

правдоподобия гипотезы применимости закона Пуассона к конкретному виду по факту хотя бы приблизительного наблюдения равенства $\hat{N} = D$.

Таким образом, прогнозирование аварийных ситуаций возможно на основе элементарной статистики. Такого рода данные представляют интерес при принятии решений о мерах по снижению степени риска аварий на объектах.

Значения вероятности аварий $Q(N, \lambda\tau)$ и риска возможной аварии $\bar{\theta}$ для числа $N \leq 5$ приведены в таблице 10 и на рисунке 40.

Закон Пуассона является частным (предельным) случаем биномиального распределения при большом числе маловероятных событий.

Таблица 10.

Вероятность N аварий и оценка риска аварийности $\bar{\theta}$ в зависимости от параметра $\lambda\tau$ согласно распределению Пуассона

	0,1	0,2	0,3	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
0	0,905	0,81 9	0,741	0,60 7	0,3 68	0,1 35	0,0 50	0,018	0,007
1	0,091	0,16 4	0,222	0,30 5	0,3 68				
2	0,004 5	0,01 6	0,033	0,07 6	0,1 84	0,2 71			
3	0,000 2	0,00 1	0,003	0,01 3	0,0 61	0,0 18	0,2 24		
4		10^{-4}	$3 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	0,0 15	0,0 9	0,1 68	0,195	
5				$2 \cdot 10^{-4}$	0,0 03	0,0 36	0,1 01	0,156	0,176
$\bar{\theta}$	0,095	0,18 1	0,259	0,39 3	0,6 32	0,8 65	0,9 50	0,982	0,993

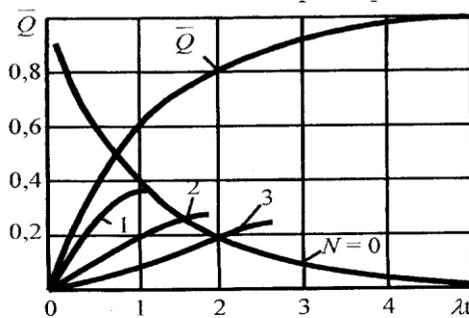


Рисунок 40. Вероятность аварий и оценка риска \bar{Q} аварийности в зависимости от параметра $\lambda\tau$

В связи с этим формулу Пуассона называют законом редких явлений. Распределение Пуассона для нескольких значений $\lambda\tau$ показывает, что при больших значениях $\lambda\tau$ ($\lambda\tau \geq 10$) распределение приближается к нормальному распределению $\mu = \sigma^2 = \lambda\tau$

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right] \quad (73)$$

Закон Пуассона широко используют на практике, применительно к различным областям техники и природным процессам, в частности, в теории надежности при проверке качества, при прогнозировании сейсмического риска и др.

Оценку надежности производственных установок и различной аппаратуры, а также обслуживания персоналом можно провести с использованием биномиального распределения подсчетом вероятности как частоты r успешных событий (например, пусков и т.н.) при их общем числе n . Доверительный интервал для фактической вероятности P_T , определяется уравнением:

$$\sum_{i=r}^n \binom{n}{i} \cdot p^i \cdot (1-p)^{n-i} = 1-a, \quad (74)$$

где $\binom{n}{j} = n!/[j!(n-j)!]$ биномиальные коэффициенты;
 P – нижняя граница искомой надежности P_T ;
 a - достоверность того, что фактическая вероятность P_T находится в интервале $P \dots 1$.

Значения вероятности P_T при достоверности $a = 0,8$ приведены в таблице 11 для трех значений n .

Таблица 11

Вероятность успешных (безаварийных) событий с достоверностью 0,8 при различных значениях r

n	2	4	6	8	10	12	14	16
10	0,083	0,240	0,418	0,619	0,851			
15	0,056	0,157	0,272	0,394	0,524	0,662	0,813	
20	0,041	0,117	0,201	0,291	0,384	0,481	0,582	0,686

Рассмотрим альтернативный подход с привлечением модели, учитывающей некоторые физические процессы, полагая, что авария на взрывоопасном объекте возникает в результате накопления элементарных повреждений у при достижении некоторого предельно допустимого износа M . Процесс накопления повреждений фиксируется функцией износа $\eta(t)$. Отказ наступает при условии $\eta(t) \geq M$ и числе элементарных повреждений $r = M/y$.

Для объектов с высокой однородностью начального качества (обеспечивается жестким контролем качества и технологии производства, что обычно реализуется при изготовлении труб, сосудов, резервуаров и газгольдеров) расчет вероятности отказа (аварии) возможен с использованием модели моно-тонно стареющих систем, т.е. с накапливающимися повреждениями, на основе

гамма-распределения времени T функционирования:

$$F(t) = \frac{1}{\Gamma(r)} \cdot \lambda^r \cdot T^{r-1} \cdot \exp(-\lambda T)$$

где $\Gamma(r)$ - гамма-функция;

$\lambda = y^{-1} \cdot dM[\eta(t)]/dt$ - скорость износа.

Для целых значений r гамма-функция $\Gamma(r) = (r - 1)!$, λ - средняя скорость износа и функция распределения гамма-распределения имеет вид:

$$Q(N, \lambda \tau) = 1 - \sum_{k=0}^{r-1} \frac{(\lambda T)^k}{k!} \exp(-\lambda T) = 1 - \exp(-\lambda T) [1 + \lambda T + (\lambda T)^2 / 2! + \dots + (\lambda T)^{r-1} / (r-1)!] \quad (75)$$

При $r = 1$ выражение (75) соответствует плотности экспоненциального распределения (мгновенный выход из строя при однократном повреждении).

Методы определения параметров λ и r приведены в работе [108]. Один из методов основан на данных о времени безотказной работы τ_i для N однотипных объектов. Средняя для $\bar{\tau}$ и дисперсия S_{τ}^2 времени безотказной работы вычисляется по формулам:

$$\bar{\tau} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_i, S_{\tau}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\tau_i - \bar{\tau})^2$$

Значения искоемых параметров определяют из соотношений:

$$\lambda = \bar{\tau} / S_{\tau}^2; r = \bar{\tau}^2 / S_{\tau}^2$$

Прогноз аварийности объектов, эксплуатируемых после истечения срока службы, возможен и на

основе распределения Зайбулла. Приведем примеры расчета оценки риска аварий.

Пример 1.

На объекте за 20 лет произошло 4 аварии, т.е. среднее число аварий равно $\lambda = 4/20 = 0,2 \text{ лет}^{-1}$. Тогда за период $\tau = 2$ года две аварии ($N=2$) могут произойти с вероятностью $Q(2; 0,2 \times 2) = 0,4^2 \exp(-0,4)/2! = 0,054$, а одна авария - с вероятностью $Q(1; 0,4) = 0,227$.

Вероятность безаварийного функционирования объекта $Q(0, \lambda \tau)$ в течение двух лет равна $Q(0; 0,4) = \exp(-0,4) = 0,67$, а в течение одного года $Q(0; 0,2) = \exp(-0,2) = 0,82$, т.е. риск аварийных ситуаций за двухлетний период составит $1 - 0,67 = 0,33$, а за один год $0,18$.

Пример 2.

Средняя скорость износа агрегата с взрывоопасным энергоносителем $\lambda = 0,02 \text{ час}^{-1}$. Предельное число элементарных повреждений $r = 6$. Агрегат функционирует 3 часа в сутки. Определим риск аварий в течение недели.

За указанный срок время работы агрегата $T = 7 \times 3 = 21$ час, $\lambda \cdot T = 0,42$. По формуле (75) оценка величины риска:

$$Q(0,42) = 1 - \exp(-0,42) \left(1 + 0,42 + \frac{0,42^2}{2!} + \frac{0,42^3}{3!} + \frac{0,42^4}{4!} + \frac{0,42^5}{5!} \right) = 5,33 \cdot 10^{-6}$$

6.2 Анализ статистических данных по взрывам горючих газов

Статистические данные свидетельствуют о том, что ущерб от взрывов в производственных зданиях во всем мире остается довольно большим и имеет

тенденцию ежегодного увеличения. Этому способствуют интенсификация и концентрация производств, повышение их энерговооруженности, введение новых веществ, взрывоопасные свойства которых подчас недостаточно изучены.

Так, в США в период с 1900 по 1953 год зарегистрировано 1100 взрывов, т.е. около 21 взрыва в год, с 1951 по 1960 год - 243 взрыва, а далее – примерно 24 взрыва в год [109, 110].

В настоящее время ежегодные убытки, по данным американского страхового общества, на предприятиях страны составляют около 75 млн. долларов. По сведениям национальной ассоциации по борьбе с пожарами США ежегодный материальный ущерб, причиняемый взрывами и пожарами в американской промышленности, превысил 138 млн. долларов [111, 112].

В Японии за три года было зарегистрировано 5475 смертельных несчастных случаев, происшедших в результате взрывов и пожаров в различных отраслях промышленности [113].

По данным английской национальной ассоциации противопожарной защиты ежегодные потери в результате производственных взрывов составили около 100 млн. долларов [114].

Взрывы, связанные с горючими газами, легковоспламеняющимися парами горючих жидкостей, пылями, чаще всего происходят в химической, нефтехимической, газовой и некоторых других отраслях промышленности.

Для производственных зданий, где возможны

взрывы горючих смесей, наряду с мерами по их предотвращению принимаются меры по защите людей, оборудования и строительных конструкций в случае возникновения взрыва внутри помещения. Такое положение объясняется тем, что образование взрывоопасных концентраций происходит так быстро, что обслуживающий персонал, как правило, не в состоянии предотвратить взрыв.

Большая скорость распространения пламени и значительное количество тепла, выделяющееся при взрыве горючих смесей в объеме помещения, приводит к резкому повышению давления и к разрушению элементов оборудования и строительных конструкций, к человеческим жертвам, повреждению техно-логического оборудования и остановке производства.

Многолетний анализ аварий, происходящих на предприятиях химической и нефтехимической промышленности в странах СНГ и за рубежом, показывает, что большая часть их (около 90%) связана с образованием и взрывом парогазовых смесей. Из этого числа около 43% аварий приходится на производственные помещения и открытые установки [115].

Несмотря на оснащение производственных объектов со взрывоопасными производствами самыми современными средствами взрывозащиты технологического плана, взрывы в объемах до сих пор имеют место. Основной ущерб производству и обслуживающему персоналу наносится за счет

разрушения строительных конструкций.

Для решения перспективных вопросов техники безопасности следует изучать возможности образования взрывоопасных газовых смесей и на этой основе разрабатывать эффективные средства предупреждения аварий.

Из проанализированных аварий, происшедших в различное время на предприятиях химической и нефтехимической промышленности, 86 аварий (взрывы в закрытых системах) вызваны неисправностью блокировки и приборов, 24 аварии (взрывы в наружных установках) произошли из-за отсутствия сигнализаторов взрывоопасных газов и соответствующих средств локализации выбросов газов в атмосферу, т.е. 110 взрывов можно было предотвратить.

Отсутствие или ненадежность соответствующих средств против аварийной защиты от загазованности в ряде случаев приводили к взрывам газов в рабочих помещениях и на открытых установках.

Анализ аварий проводился на основании актов расследования аварий, результатов натурных обследований производств, с использованием результатов натурных обследований производств, с использованием материалов, опубликованных в открытой печати.

Основные задачи проводимого анализа:

1. установление главных причин аварий с позиции взрывоопасности эксплуатируемого производства;

2. выявление основных элементов оборудования, являющихся источниками образования взрывоопасных смесей в объеме помещения;

3. установление числа взрывов в зависимости от источников воспламенения газовой смеси;

4. оценка распределения числа взрывов на предприятиях по разрушающему воздействию на строительные конструкции и оборудование.

Результаты анализа распределения причин взрывов в производственных объемах приведены в таблице 12.

При эксплуатации взрывоопасных производств источником образования взрывоопасной среды в объеме помещения является, как правило, технологическое оборудование.

Знание элементов оборудования, которые наиболее часто являются источниками создания горючей среды, необходимо для разработки профилактических мероприятий по предупреждению взрывов и выбору методов защиты.

Горючие газы, находящиеся в технологическом оборудовании, могут попасть в объем производственного помещения в случае разрушения оборудования.

При повреждении корпуса аппарата или срыве крышки возможен мгновенный выброс горючего газа в помещение и образование взрывоопасной концентрации значительного объема за несколько секунд.

Таблица 12

Анализ причин аварий в производственных помещениях

Причины аварий	Количество взрывов в год, %		
	1995-2000	2001-2005	2006-2010
1	2	3	4
1. Некачественно выполненный монтаж технологического оборудования	8,0	6,8	4,9
2. Неисправность контрольно-измерительной аппаратуры	9,2	5,8	7,5
3. Ошибки, допущенные в проектной документации	4,2	6,8	8,5
4. Дефекты в элементах оборудования	3,6	5,8	6,6
5. Неисправность элементов основного технологического оборудования	4,2	1,9	2,5
6. Ошибки в разработке технологического режима	2,0	1,9	2,6
7. Нарушение правил безопасности эксплуатации технологического оборудования	32,3	29,1	27,1
8. Некачественно выполненный профилактический ремонт оборудования	10,5	13,8	14,3
9. Нарушение правил ремонта оборудования	14,3	11,6	12,8
10. Коррозия стенок элементов оборудования и трубопроводов	3,5	7,7	4,2
11. Другие причины	6,2	1,9	9,0

При разрыве трубопровода происходит истечение

горючей среды струей и возможно образование взрывоопасной концентрации в объеме помещения в течение нескольких минут.

При медленной утечке газа, например, через запорную арматуру, взрывоопасная смесь образуется в течение времени, которого вполне достаточно для приведения в действие вытяжной вентиляции и других противопожарных и противовзрывных мер защиты.

В каждом случае количество газа, попавшего в атмосферу помещения, может быть определено с некоторым допущением, если известен аппарат или группа аппаратов, которые относятся к вероятным источникам аварийного образования взрывоопасной смеси.

Производственное оборудование, которое относится к потенциальным источникам образования взрывоопасной смеси в объеме помещения, находится под постоянным надзором обслуживающего персонала. Нормально эксплуатируемое оборудование работает без аварий, без дорогостоящих ремонтов и простоев, дезорганизирующих производство.

В процессе эксплуатации машин и аппаратов происходит потеря их работоспособности главным образом из-за разрушения отдельных деталей или их поверхностных слоев за счет механического или коррозионного износа, зависящего от среды, в которой работает оборудование. В результате этого оборудование теряет прочность, точность, уменьшается его мощность и производительность. Восстановление этих важнейших показателей осуществляется с помощью ремонта.

Система предупредительного ремонта оборудования действует на предприятиях химической и нефтехимической промышленности свыше 40 лет и хорошо зарекомендовала себя на практике. В ее основу положен обобщенный опыт эксплуатации и ремонта оборудования на предприятиях химической и нефтехимической промышленности. При этом используются опытно-статистические ремонтно-нормативные материалы предприятий химической и нефтехимической промышленности, научно-исследовательских и проектных институтов химической и нефтехимической промышленности.

В настоящее время разработана система предупредительного ремонта химического оборудования и транспортных средств на предприятиях химической и нефтехимической промышленности.

Основной целью системы предупредительного ремонта оборудования, представляющего собой совокупность организационно-технических мероприятий по надзору и уходу за оборудованием, включая коммуникации, является предупреждение аварий оборудования. Основным параметром для установления системы ремонта оборудования является время работы в часах между ремонтами. Знание того, в какой группе элементов наиболее вероятно возникновение аварийного состояния на основании имеющихся данных по известным срокам безаварийной эксплуатации каждого элемента, позволит приблизиться к решению задачи по определению вероятного объема горючей смеси, образовавшейся в помещении, для оценки интенсивности воздействия взрывных

нагрузок на строительные конструкции внутри помещения.

Все оборудование в производственном помещении, которое может быть источником выброса горючих газов, можно разбить на отдельные группы, каждая из которых, в свою очередь, может состоять из ряда независимых однородных элементов. Поскольку отказ какого-то элемента заранее нельзя предсказать с полной достоверностью в силу случайной природы этого явления, то, естественно, в данной ситуации можно применить методы теории вероятности и построить вероятностную модель.

Перечень элементов технологического оборудования, наиболее часто являющихся источниками образования горючих смесей в объеме помещения, приведен в таблице 13.

Таблица 13

Элементы технологического оборудования как потенциальные источники взрывов

Наименование элементов технологического оборудования	Количество взрывов в год %		
	1995-99	2000-2004	2005-2010
1	2	3	4
1. Емкости и резервуары	8,6	6,8	5,2
2. Технологические колонны	12,7	10,6	9,3
3. Компрессоры	6,0	9,7	11,2
4. Конденсаторы	8,6	7,8	6,2
5. Кубы	1,5	1,9	1,6
6. Насосы	2,5	2,9	4,2
7. Регенераторы	-	1,9	1,5
8. Технологические печи	-	1,9	-
9. Скрубберы	4,5	4,9	6,1

продолжение таблицы 13

1	2	3	4
10.Смесители	1,5	1,9	3,4
11. Трубопроводы	3,2	3,9	7,6
12. Фланцевые соединения трубопроводов	16,2	14,5	12,3
13. Запорная и регулировочная арматура	8,7	12,6	10,8
14. Прочие	5,9	4,0	11,7
15. Не установленные или не указанные в документации	20,2	14,7	8,9

При расследовании аварий зачастую трудно установить действительный источник воспламенения взрывоопасной смеси. В имеющихся материалах по аварийным взрывам в большинстве случаев указывается вероятный источник воспламенения, что в значительной мере затрудняет разработку обоснованных профилактических мероприятий. Наиболее вероятные источники воспламенения, установленные на основании изучения материалов расследования аварий, приведены в таблице 14.

Таблица 14

Вероятные источники воспламенения

Источник воспламенения	Количество взрывов в год, %		
	1995-99	2000-2004	2005-2010
1	2	3	4
1.Открытый технологический огонь	12,8	19,4	15,8

продложение таблицы 14

1	2	3	4
2.Открытый огонь при ремонтных работах	4,2	3,9	6,3
3.Искры, возникающие при электросварочных работах	4,4	3,9	3,0
4.Искры в электрооборудовании и от короткого замыкания	6,7	5,8	8,5
5.Искры при разрядах статического электричества	2,0	1,0	2,5
6.Нагретые поверхности технологического оборудования	10,2	10,7	14,2
7.Самовоспламенение при взаимодействии с кислородом	20,1	19,4	15,7
8.Прочие	13,8	2,9	6,7
9.Не установленные или не указанные в документации	28,6	27,2	22,3

Для эффективного использования моделей теории надежности для оценки риска аварии необходимо располагать статистической информацией об интенсивности отказов (аварий) на предприятиях. В таблицах 15 и 16 приведены данные по статистике взрывов, связанные с тяжелыми авариями на различных установках промышленных предприятий и емкостях со взрывоопасными веществами. В таблицах 15 и 16 приведены значения среднестатистической интенсивности λ тяжелых аварий со взрывами. Предполагается, что указанные в таблице объекты распределены по территории равномерно. Кроме того, чтобы прогнозировать аварийность, следует

предположить, что плотность объектов существенно не изменилась. Столь сильные предпосылки связаны с ограниченностью информации об авариях со взрывами в конкретных городах, не охваченных судопроизводством.

Таблица 15

Статистика аварийных взрывов газопыле-воздушных смесей за 1990-2010 годы

Виды аварий	λ , лет ⁻¹
1	2
1. Аварии на городских газопроводах (трубопроводах)	1,54
2. Взрывы в цехах взрывоопасных производств	0,857
3. Взрывы на установках технологического оборудования взрывоопасных производств	2,0
4. Взрывы в резервуарах, котлах и различных емкостях со взрывоопасными продуктами	0,333
5. Взрывы в жилых и общественных зданиях	2,0

Таблица 16

Распределение 150 аварийных взрывов по видам энергоносителя или видам аварий за 1990-2010 годы

Энергоноситель или вид взрыва	λ , лет ⁻¹
1	2
1. Газопаровоздушные смеси:	
- углеводородные газы	3,2
- пары легковоспламеняющихся жидкостей	1,15

продолжение таблицы 16

1	2
- водород	1,35
2. Пыль органических продуктов	0,4
3. Конденсированные нестабильные ВВ	0,9
4. Взрывы в атмосфере	3,3
5. Аварийные взрывы, вызвавшие серьезные разрушения зданий, сооружений и оборудования	3,65
6. Взрывы в технологической аппаратуре	4,2
7. Выбросы токсичных веществ	2,4

При оценке риска аварий со взрывами на промпредприятиях следует пользоваться данными таблицы 17, в которой приведены значения λ для наиболее распространенных элементов промышленного оборудования, отказ в нормальной работе которых приводит к авариям.

Таблица 17

Средние значения параметра Λ для оборудования предприятий взрывоопасных производств

Элемент оборудования	$10^6, \text{ч}^{-1}$
1	2
1.Задвижки клапанов	5,1
2. Клапаны рычажные	4,5
3.Клапаны дренажные	0,224
4. Манометры	1,3
5. Моторы гидравлические	4,3
6. Насосы с машинным приводом	8,74
7. Прокладки пластмассовые	0,05
8. Прокладки резиновые	0,02
9. Регуляторы давления	4,25

продолжение таблицы 17

1	2
10. Резервуары гидравлические	0,15
11. Сильфоны	2,287
12. Соединения гидравлические	0,03
13. Соединения пневматические	0,04
14. Трубопроводы	1,1
15. Шланги высокого давления	3,39
16. Предохранительные мембраны	0,011

6.3 Оценка риска аварийных взрывов от разгерметизации баллонов со сжиженным газом

При уплотнении грунта газовзрывным способом в установке используются баллоны с пропаном и кислородом. Поэтому нельзя исключать возникновение ситуации, связанной с разгерметизацией баллона с пропаном кислородом.

Применение сжиженных газов регламентировано ГОСТом 20448-80. Для хранения и транспортировки сжиженных газов используют сосуды различной емкости: баллоны объемом до 120л, бочки 100-500л, резервуары - более 500л. В таблице 18 приведены данные по баллонам: диаметр цилиндрической обечайки D , толщина стенки S и полная длина H .

Таблица 18

Данные баллонов для сжиженных газов

Емкость, л	Масса баллона, кг	Масса газа, кг	D , мм	S ,мм	H ,мм
1	2	3	4	5	6
5	4	2	222	2	284
12	6	5	222	2	470

продолжение таблицы 18

1	2	3	4	5	6
27	14,5	11,4	299	3	575
50	22	21,2	299	3	960
80	31,5	34	299	3	1404

Для газоснабжения городов широко используют природные газы, добываемые из земных недр газовых и газоконденсатных, а также нефтяных месторождений. Газы чисто газовых месторождений (сухие газы) в основном состоят из метана и небольшого количества тяжелых углеводородов (до 50г/м^3). Так, газ ямбургского газового месторождения (Тюменская область) состоит из 95,4% метана, а на долю тяжелых углеводородов приходится не более 0,5%. Плотность сухих природных газов при 0°C и атмосферном давлении 101,3кПа бывает в пределах 0,6-0,8кг/м³. Теплота сгорания (низшая) 33-40МДж/м³.

Нефтяные газы могут быть тяжелее воздуха. Кроме основного содержания (метана) в их состав входят тяжелые углеводороды (более 150г/м^3), а теплота сгорания достигает 60 МДж/м³.

В наиболее распространенных газовоздушных смесях (ГВС) стехиометрического состава объемная концентрация газа находится в пределах 4-10%, и теплота сгорания смеси имеет значения 3,4-4,3 МДж/кг, а при плотностях ГВС порядка 1,3 кг/ м³ и' составляет 2,6-3,3 МДж/кг, что в среднем всего лишь на 30% меньше теплоты взрыва Q конденсированного взрывчатого вещества (для тротила $Q = 4,24$ МДж/кг).

Сжиженный газ, используемый в газоснабжении городов, производят на газобензиновых заводах

выделением тяжелых углеводородов (пропана, этана, бутана) из газов нефтяных и газоконденсатных месторождений.

Наиболее употребительными сжиженными энерго-носителями являются пропанобутановые смеси. Это объясняется тем, что пропан и бутан, находясь в естественных условиях в газообразном состоянии, переходят в жидкое состояние при сравнительно небольшом сжатии. Так, 0°С пропан сжижается при давлении 0,47 МПа, бутан - при 0,115 МПа, а изобутан - при 0,16 МПа.

Для газоснабжения согласно нормам используются сжиженные углеводородные газы нескольких марок: СПБТЗ - смесь пропана и бутана технических зимняя, СПБТЛ - смесь пропана и бутана технических летняя, БТ - бутан технический (таблица 19).

Таблица 19

Состав (по массе) сжиженных углеводородных газов трех марок, регламентированных нормами

Показатель	СПБТЗ	СПБТЛ	БТ
1	2	3	4
1. Сумма пропана и пропилена, %, не менее	75	Нн	Нн
2. Сумма бутанов и бутиленов, %, не менее	Нн	-	60
3. Сумма метана, этана, этилена, %, не более	4	6	6
4. Жидкий остаток (по объему), %, не более	1	2	2
5. Давление насыщенных паров $P_{изб}$, МПа			
- при +45°С, не более	1,6	1,6	1,6
- при -45°С, не менее	0,16	-	-
6. Массовая доля сероводорода:			

продолжение таблицы 19

1	2	3	4
- меркаптановой серы, %, не более	0,015	0,015	0,015
- в том числе сероводорода, %, не более	0,003	0,003	0,003
7. Свободной воды и щелочи	-	-	-

Примечание: нн - не нормируется.

Характеристики углеводородов в составе сжиженных газов и данные о зависимости упругости (давления) насыщенных паров от температуры приведены в таблицах 20 и 21.

Таблица 20

Характеристики углеводородов, входящих в состав сжиженных газов

Характеристика	Пропан C_3H_8	Н-бутан н- C_4H_{10}	Изобутан изо- C_4H_{10}
1	2	3	4
1. Молекулярная масса, кг	44,1	58,12	58,12
2. Газовая постоянная, Дж/(кг·К)	184,92	140,3	140,3
3. Критические параметры:			
- температура, $^{\circ}C$	96,84	152,0	134,98
- давление, МПа (абс)	4,21	3,75	3,6
- плотность, $кг/м^3$	226	225	

продолжение таблицы 20

1	2	3	4
4. Параметры при 0° С и 101,3 кПа			
- молекулярный объём, м ³ /кмоль	22	21,5	21,74
- плотность газовой фазы, кг/м ³	2,0037	2,703	2,668
- плотность жидкой фазы, кг/м ³	528	601	582
5. Упругость насыщенных паров при 0° С, МПа (абс)	0,47	0,115	0,16
6. Температура кипения T _к	-42,1	-0,5	-10,2
7. Теплота испарения при T=T _и , кДж/кг	427,1	385,69	336,4

Таблица 21

Зависимость некоторых параметров углеводородов от температуры T: P_{абс} - упругость насыщенных паров; ρ_ж, ρ_п - плотности жидкости (ж) и сухого насыщенного пара (п); Q - скрытая теплота испарения

T, °C	Пропан				Изобутан			
	P _{абс} , МПа	ρ _ж , кг/м ³	ρ _п , кг/м ³	10 ⁻³ · Q, Дж/кг	P _{абс} , МПа	ρ _ж , кг/м ³	ρ _п , кг/м ³	10 ⁻³ · Q, Дж/кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9
-60	0,04	606	1,11	441,71				

продолжение таблицы 21

1	2	3	4	5	6	7	8	9
-55	0,05	598	1,36	435,4				
-50	0,06	593	1,81	427,1				
-45	0,09	587	2,07	425,0				
-40	0,11	581	2,61	419,5				
-35	0,14	575	3,25	416,5				
-30	0,17	565	3,87	410,3	0,054	619	1,49	386
-25	0,20	559	4,62	404,0	0,060	610	1,65	380,2
-20	0,24	553	5,48	339,9	0,073	606	1,96	375,2
-15	0,29	548	6,40	396,1	0,090	600	2,50	371,0
-10	0,34	542	7,57	387,7	0,110	594	3,04	366,4
-5	0,41	535	9,05	383,1	0,133	588	3,59	359,7
0	0,47	528	10,37	379,8	0,160	582	4,31	355,5
5	0,55	521	11,90	371,4	0,192	576	5,07	349,2
10	0,63	514	13,60	364,3	0,225	570	5,92	345,0
15	0,73	507	15,51	335,5	0,253	565	6,95	339,1
20	0,83	499	17,74	345,4	0,360	560	7,94	334,5
25	0,95	490	20,15	339,1	0,355	553	9,21	327,0
30	1,07	483	22,80	329,1	0,410	546	11,50	322,8
35	1,21	474	25,30	320,3	0,471	540	13,00	316,1
40	1,37	464	28,60	311,5	0,539	534	14,70	310,3
45	1,53	451	34,50	301,5	0,606	527	16,80	301,5
50	1,70	446	36,80	284,7	0,695	520	18,94	296,4
55	1,89	437	40,22	270,1	0,781	513	20,56	285,1
60	2,10	434	44,60	262,1	0,869	505	24,20	275,1

В различных емкостях газ находится в насыщенном состоянии, и давление зависит от температуры. При транспортировке пропана в железнодорожных цистернах рабочее давление составляет 2 МПа, а бутана - 0,8 МПа. Сильная зависимость параметров газа от температуры является основным источником опасностей в газовом хозяйстве.

В связи с большим коэффициентом объемного

расширения углеводородов (в 15-16 раз превышающим этот коэффициент для воды) баллоны и резервуары заполняют сжиженным газом на 0,8-0,9 емкости, чтобы обеспечить наличие паровой фазы, т.е. возможность расширения при нагреве жидкой фазы без резкого роста давления до расчетного значения.

Для газоснабжения сжиженными углеводородными газами (СУГ) с повышенным содержанием бутана при прокладке газопроводов в зонах с температурой 0°С избыточное давление насыщенного пара н-бутана равно нулю. Для поднятия давления используют газоздушную смесь состава, для которого обеспечивается парциальное давление бутана без конденсации и безопасность от взрыва (концентрация газа в смеси должна в два раза превышать верхний предел взрываемости - для пропан-бутановой смеси с воздухом 10% по объему).

Опасность аварии при использовании баллонов и других герметичных емкостей с жидкими газами связана с существенным повышением плотности паровой фазы и давления от нагрева при некотором уменьшении плотности жидкости и уменьшении объема паровой подушки или ее исчезновении. Указанные изменения параметров можно проиллюстрировать на следующем примере. Если пропан находится в сосуде при температурах -25, -10, 0, 10, 25 и 35°С, то давление и параметры жидкой и паровой фаз вещества согласно таблице 21 имеют значения:

T ⁰ С	-20	-10	0	10	25	35
P _{абс} , МПа	0,24	0,34	0,47	0,63	0,95	1,21
P _{изб} , МПа	0,14	0,24	0,37	0,53	0,85	1,11
P _ж , кг/л	0,553	0,542	0,528	0,514	0,49	0,474
P _п , кг/м ³	5,48	7,57	10,37	13,6	20,15	25,3

Определим условия исчезновения паровой фазы в первоначально не полностью заполненной сжиженным газом емкости. Пусть K_0 - коэффициент первоначального заполнения жидким газом баллона объемом V при температуре T^0 (имеется ввиду термодинамическое равновесие). При этой температуре плотности фаз $\rho_{ж}$ и $\rho_{п}$ можно найти по таблице 21.

Полная масса газа равна:

$$M = V \cdot [\rho_{ж} \cdot K_0 + \rho_{п} \cdot (1 - K_0)],$$

и при полной конденсации пара, т.е. заполнение всего объема сжиженным газом, его плотность составит $\rho_* = M/V$, чему соответствует давление P_* по таблице 21.

Так, для пропана при $K_0 = 0,9$; $T = 10^\circ\text{C}$ имеем $\rho_{ж} = 0,514 \cdot 10^3$ кг/м³; $\rho_{п} = 13,6$ кг/м³; $M = V \cdot [0,514 \cdot 10^3 \cdot 0,9 + 13,6 \cdot (1 - 0,9)] = V \cdot 464$ кг, и плотность $\rho_* = M/V = 464$ кг/м³. По таблице 21 полученному значению плотности соответствует температура $T_* = 40^\circ\text{C}$ и давление $P_* = 1,37$ МПа (избыточное давление 1,27 МПа). При дальнейшем повышении температуры и расширении жидкой фазы произойдет резкое увеличение давления, напряжений в стенках сосуда и разрушение с выбросом жидкого пропана.

Поскольку первоначальные значения параметров газа в емкости при изменении температуры

меняются, контроль возможного повышения давления и опасности исчезновения паровой фазы можно осуществить расчетом. Пусть емкость объемом V первоначально заполнена жидким газом массой M при температуре окружающей среды T_0 . В предположении о наличии паровой фазы параметры газа P^* , $\rho_{ж}$, $\rho_{п}$ определяются данными таблицы 21. Из формулы для баланса массы $M = \rho_{ж} \cdot V_{ж} + \rho_{п}(V - V_{ж})$ найдем объемы $V_{ж}$, $V_{п}$ жидкой и паровой фаз:

$$V_{ж} = (M - \rho_{п} \cdot V) / (\rho_{ж} - \rho_{п}), \quad V_{п} = V - V_{ж}.$$

Данное предположение оправдывается, если окажется, что $V_{ж} < V$, т.е. $V_{п} > 0$. В этом случае массы $M_{ж}$, $M_{п}$ жидкой и паровой фаз будут: $M_{ж} = \rho_{ж} \cdot V_{ж}$; $M_{п} = \rho_{п} \cdot V_{п}$.

Например, для баллона емкостью 50л ($V = 0,05\text{м}^3$), залитого пропаном $M = 30$ кг, при установившейся температуре окружающей воздушной среды $T_0 = 25^\circ\text{C}$ по таблице 21 найдем $P^* = 0,95$ МПа, $\rho_{ж} = 490$ кг/м³, $\rho_{п} = 20,15$ кг/м³ и объем $V_{ж} = (30 - 20,15 \cdot 0,05) / (490 - 20,15) = 0,0617 > V = 0,05\text{м}^3$, т.е. предположение о наличии паровой подушки не оправдывается, реальное давление превышает давление насыщенного пара P^* , и ситуация чревата разрушением баллона.

Предельному случаю залива, при котором паровая фаза исчезнет, соответствует масса сжиженного пропана $M = \rho_{ж} \cdot V = 490 \cdot 0,05 = 24,5$ кг, где $\rho_{ж}$ - плотность жидкого энергоносителя при температуре термодинамического равновесия, т.е. окружающей среды. Последним простым соотношением рекомендуется пользоваться для быстрой оценки допустимой массы заливаемого сжиженного газа в сосуды.

Например, при 80% бутана конденсация для

пропан-бутановой смеси происходит под давлением 0,1043 МПа при температуре -4°C , а для газозоудшной смеси при том же давлении и составе «воздух/СУГ»: 50%/50% при -21°C . Такая смесь эквивалентна природному газу.

Пример 3.

Для примера проанализируем причины аварийного взрыва в здании дома №19 по ул. Сормовской г. Москвы вследствие выброса сжиженного газа при аварийном вскрытии 50 литрового баллона.

Взрыв произошел в помещении венткамеры, расположенной в подвале здания. В результате визуального обследования состояния здания после аварийного взрыва следует считать, что данная ситуация соответствует сильным повреждениям конструкций. Предположительно, взрыв произошел в результате разрушения баллона емкостью $V_6=50$ литров со сжатой смесью пропан-бутана.

Проведем расчет параметров в результате разрушения баллона и выброса топлива. Объем помещения $V=192\text{м}^3$, коэффициент коррекции объема помещения $K_1=0,8$ (20% объема, заполненного оборудованием).

В предположении, что при выбросе жидкого газа и его испарении в помещении образовалось газозоудшное облако стехиометрического состава с плотностью по пропану $\rho_{\text{стх}}=1,315\text{ кг/м}^3$, полная масса смеси составит $M_{\text{стх}}=\rho_{\text{стх}} \cdot K_1 \cdot V=1,315 \cdot 0,8 \cdot 192 = 202,0\text{кг}$. Начальная масса воздуха при его плотности $\rho=1,225\text{ кг/м}^3$ равна $M_{\text{в}}=188,2\text{ кг}$. Масса выброса составит $M=202,0 - 188,2=13,8\text{ кг}$.

Перед аварией газ в баллоне находился в насыщенном состоянии под давлением, зависящем

от температуры. Разрушение сосуда могло произойти при отказе предохранительного клапана сброса давления и нагреве от внешнего теплового источника.

Опасная ситуация возникает, если в процессе нагревания и расширения жидкой фазы газовая фаза полностью исчезнет. Это может произойти при стопроцентном заполнении баллона, т.е. объема V_6 жидкостью при плотности $\rho_{ж} = M/V = 13,8/0,05 = 276,48 \text{ кг/м}^3$, что нереально.

При окружающей температуре T избыточное давление ΔP и плотности газовых (жидкой, $\rho_{ж}$ и газообразной, $\rho_{п}$) в баллоне в летних условиях имеют значения:

T^0, C	10	25	35	45	55
$P, \text{МПа}$	0,53	0,85	1,11	1,43	1,79
$P_{ж}, \text{кг/м}^3$	514	490	474	451	431
$P_{п}, \text{кг/м}^3$	13,6	20,15	25,3	34,5	40,22

При температуре порядка 45°C плотность $\rho_{ж} = 451 \text{ кг/м}^3$, что соответствует массе $M_* = 451 \cdot 0,05 = 22,5 \text{ кг}$. Эта величина почти точно соответствует нормативному заполнению баллона по ГОСТ. Норма заполнения составляет $0,425 \text{ кг/л}$, т.е. для баллона емкостью 50 литров равна $M_{**} = 0,425 \cdot 50 = 21,2 \text{ кг} \approx M_*$.

Поскольку $M_* > M$, т.е. концентрация смеси при условии равномерного распределения топлива по объему превышает стехиометрическое значение, вероятность взрыва становится очень высокой, так как нижний концентрационный предел и стехиометрический состав смеси достигается на ранней стадии испарения и перемешивания газа с воздухом.

Из данного анализа следует, что при взрыве количество прореагировавшего газа было не меньше,

чем для стехиометрического состава, т.е. в диапазоне 13,8-21,2кг, причем наиболее вероятной причиной взрыва был подогрев баллона до температуры порядка 45°C.

Полученный результат показывает, что заполнение баллонов сжиженным газом согласно нормативным требованиям представляет опасность, если возможно повышение температуры до 45°C. При указанной температуре давление насыщенных паров для пропана (1,43 МПа) ниже расчетного (1,6 МПа). Однако, при исчезновении паровой фазы вследствие расширения жидкости при дальнейшем, даже несущественном повышении температуры, давление может резко возрасти, что и является причиной разрушения баллона.

ГЛАВА 7. ЗАКОНОМЕРНОСТИ АВАРИЙНЫХ ВЗРЫВОВ ГАЗОПАРОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

7.1 Особенности взрывов газопаровоздушных смесей в открытом пространстве

Взрыв представляет собой кратковременный процесс весьма быстрого превращения вещества с выделением большого количества энергии в небольшом объеме. Указанные превращения возникают в результате химической (конденсированные, жидкие и газообразные взрывчатые вещества) или ядерной реакции. К взрывным процессам, вызванным физическими причинами, можно отнести разрушения резервуаров со сжатым газом, котлов, а также мощные электрические разряды.

Взрывы газопаровоздушных и пылевоздушных смесей образуют класс объемных взрывов. Если взрывы пыли происходят в замкнутых объемах (помещениях), то взрывы газопаровоздушных смесей (ГПВС) могут происходить как в помещениях, так и в неограниченном пространстве.

Взрывы ГПВС в помещениях (зданиях) возникают в результате утечки газа из элементов оборудования. Взрывы ГПВС могут также возникать в емкостях (резервуарах, газгольдерах, цистернах, грузовых отсеках танкеров) для хранения и транспортировки взрыво- и пожароопасных веществ. Взрывы смесей горючих газов с воздухом с тяжелыми последствиями происходят на шахтах.

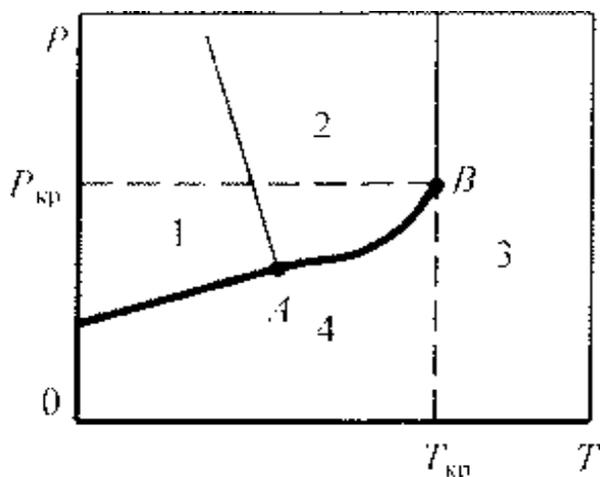
Взрывы ГПВС в неограниченном пространстве могут происходить в результате разрушений газопроводов, разлива сжиженного горючего газа, его испарения с переходом в детонацию. Известно большое число аварийных взрывов резервуаров с большим количеством сжиженного горючего газа, сопровождаемых образованием осколочного поля.

В зависимости от давления P и температуры T вещество может находиться в различных агрегатных состояниях (рисунок 41). Для сжижения газов их охлаждают и сжимают до параметров, соответствующих жидкой фазе, которые в общем случае отличаются от давления и температуры окружающей среды. Участок кривой АВ представляет условия равновесия двух фаз - жидкости и пара (линия насыщенного пара). Тройная точка А фиксирует одновременное равновесие трех фаз. В критической точке В пропадает граница между жидкостью и паром: при $T \geq T_{кр}$ вещество находится в газообразном состоянии, независимо от давления. Резкой границы между паром и газом провести нельзя. Поэтому оба эти состояния для краткости обозначаются как ГПВС.

Сжиженные углеводородные газы, хлор, аммиак, фреоны, находящиеся под сверхатмосферным давлением при температуре выше или равной температуре окружающей среды в сосудах, резервуарах и другом технологическом оборудовании, являются перегретыми жидкостями.

В теплоизолированных (изотермических) сосудах и резервуарах при отрицательных температурах

хранят сжиженные газы (метан, азот, кислород), которые называют криогенными веществами. Температура таких веществ значительно ниже, чем окружающей атмосферы.



А - тройная точка; В - критическая точка;
1 - твердая фаза; 2 - жидкость; 3-газ; 4 - пар.

Рисунок 41. Диаграмма состояния вещества

Критические параметры некоторых веществ приведены в таблице 22.

Вещества другой характерной группы (пропан, бутан, аммиак, хлор) хранят в жидком состоянии под давлением в однослойных сосудах и резервуарах при температуре окружающей среды.

В. Маршал классифицировал вещества по признаку их расположения в зонах диаграммы состояния [116]. К первой категории отнесены вещества с критической температурой ниже температуры среды (криогенные вещества - сжиженный природный газ, содержащий, в основном, метан, азот, кислород).

Таблица 22

Знасение критических параметров и плотности $\rho_{сж}$ в сжиженном состоянии некоторых веществ

Вещество	$T^{\circ}C$ кипения при 0,1 МПа	$T_{кр},^{\circ}C$	$P_{кр},MP$ а	$\rho_{сж}, кг/м^3$
1	2	3	4	5
1. Водород H_2	-252,0	-280,0	1,28	
2. Азот N_2	-196,0	-147,0	3,40	-
3. Кислород O_2	-183,0	-118,0	5,05	
4. Метан CH_4	-164,0	-82,0	4,65	1
5. Элитен C_2H_4	-103,7	9,5	5,02	567
6. Этан C_2H_6	-88,6	32,1	4,83	546
7. Пропилен C_3H_8	-47,7	91,4	4,55	608
8. Пропан C_3H_8	-42,17	96,8	4,21	582
9. Хлор Cl	-34,5	144,0	7,70	-
10. Аммиак CH_5	33,35	132,4	11,30	682
11. Бутан C_4H_{10}	-0,6	153,0	3,70	601
12. Циклогекса н C_6H_{12}	+80,7	280,0	4,01	-
13. Изобутан $(CH_3)_3CH$	-11,7	133,7	-	580
14. Пентан C_5H_{12}	+36,0	197,0	-	626
15. Двуокись углерода CO_2	-78,52	31,0	-	1180
16. Тетрафтор- метан CF_4	-128,0	-45,5	-	1960
17. Вода H_2O	+100,0	374,0	21,8	1000

Ко второй категории отнесены вещества с критической температурой выше, а точкой кипения ниже, чем в окружающей среде (сжиженный нефтяной газ, пропан, бутан, аммиак, хлор). Их особенностью является «мгновенное» (очень быстрое) испарение части жидкости при разгер-

метизации и охлаждение оставшейся доли до точки кипения при атмосферном давлении.

Третью категорию составляют жидкости, у которых критическое давление выше атмосферного и точка кипения выше температуры окружающей среды (вещества, находящиеся в обычных условиях в жидком состоянии). Сюда попадают также некоторые вещества предыдущей категории, например, бутан - в холодную погоду и этиленоксид - в жаркую.

Четвертая категория - вещества, содержащиеся при повышенных температурах (водяной пар в котлах, циклогексан и другие жидкости под давлением и при температуре, превышающей их точку кипения при атмосферном давлении).

При разлинии жидкостей третьей категории их испарение зависит от свойств летучести, температуры внешней среды и скорости ветра.

При полном разрушении емкостей с криогенными жидкостями, веществами второй категории происходит их выброс в атмосферу, вскипание с быстрым испарением и образованием облаков газопаро-воздушных смесей.

Аварийное вскрытие емкостей с негорючей или горючей перегретыми жидкостями сопровождается взрывом и опасным действием осколков. Воспламенение облака ГПВС происходит при наличии источника зажигания. При этом возможен переход дозвукового дефлаграционного режима с уско-ряющимся пламенем к детонационному сверхзвуковому. Переходу к детонации способствуют различные препятствия (строения, предметы, пересеченная местность) на пути распространения пламени, вызывающие турбулизацию.

Сферическая детонационная волна может возникнуть и непосредственно в ГПВС от слабого энергетического источника, например, от искры, если размер облака превышает некоторое критическое значение (таблица 23) и в пределах концентраций, указанных в таблице 24.

Статистика 150 аварий в России и странах СНГ за последние двадцать лет показывает, что в 42,5% случаев взрывов облаков ГПВС участвовали углеводородные газы, 15,5% - пары легковоспламеняющихся жидкостей, 18,0% - водород, 5,3% - пыль органических продуктов. Аварийные взрывы конденсированных нестабильных веществ составили 12,0%. В 30 случаях при авариях из указанного числа происходили выбросы значительных масс токсичных веществ: хлора - 17, аммиака - 11, оксидов углерода и азота - 2.

Из 150 крупных взрывов 84 произошло в технологической аппаратуре, 66 - в атмосфере. В 73 случаях при взрывах были серьезные разрушения зданий, сооружений и различного оборудования промышленных предприятий.

Таблица 23

Минимальная энергия, $E_{\text{мин}}$, инициирования ГПВС, наиболее чувствительных к детонации (смесей с объемной концентрацией μ топлива) и минимальные диаметры $d_{\text{мин}}$, облака, способного детонировать [117]

Горючий компонент	μ , об,%	$E_{\text{мин}}$, Дж	$d_{\text{мин}}$, м
1	2	3	4
1.Ацетилен C_2H_2	12,5	$1,3 \cdot 10^2$	3,12
2. Водород H_2	29,6	$4,2 \cdot 10^6$	109,6

продолжение таблицы 23

3. Пропан C ₃ H ₈	5,7	2,5·10 ⁶	85,8
4. Пропилен C ₃ H ₆	6,6	7,6·10 ⁵	58,5
5. Этан C ₂ H ₆	5,7	5,1·10 ⁶	109,6
6.Этилен C ₂ H ₄	9,5	1,2·10 ⁵	31,2
7.Метан CH ₄	12,3	2,3·10 ⁸	398,0

Аналогичные данные характеризуют аварийность, связанную со взрывами в Великобритании. Так, из общего числа аварий с выбросами и образованием облаков ГПВС в 40% случаев облака состояли из углеводородов с тремя или четырьмя атомами углерода.

Пропан, бутан и их смеси, а также сжиженный нефтяной газ участвовали в авариях в три раза чаще, чем пары бензина. С учетом объемов выработки этих продуктов промышленностью получается, что вероятность аварий, связанных с углеводородами, примерно в 30 раз больше, чем с бензином (в расчете на тонну продукта).

Таблица 24

Концентрационные (об,%) пределы детонации и воспламенения ГПВС в неограниченном пространстве и в замкнутых облаках [117,118]

Горючий компонент	Детонация				Воспламенение	
	Неогр.пр.		Замкн.об.		ниж.	верх.
	ниж	верх.	ниж.	верх.		
1	2	3	4	5	6	7
1. Ацетилен C ₂ H ₂	-	-	4,2	50	2,5	80,0
2.Бутан C ₄ H ₁₀	2,5	5,2	1,98	6,2	1,8/	8,4
3. Водород H ₂	-	-	18,3	58,9	4,0	75,0
4. Пропан C ₃ H ₈	3,0	7,0	2,57	7,37	2,1	9,5

продолжение таблицы 24

5. Пропилен C_3H_6	3,5	8,5	3,55	10,4	2,4	11,0
6. Этан C_2H_6	4,0	9,2	2,87	12,2	3,0	12,4
7. Этилен C_2H_4	-	-	3,32	14,7	2,7	36,0
8. Бензол C_6H_6	-	-	1,6	5,55	1,3	7,9
9. Ксилон C_6H_{10}	-	-	-	-	1,1	6,4
10. Циклогексан C_6H_{10}	-	-	-	-	0,57	7,8
11. Метан CH_4	-	-	-	-	5,0	15,0
12. Аммиак NH_3	-	-	-	-	15,5	27,0
13. Окись углерода CO	-	-	-	-	12,5	74,2
14. Сероводород H_2S	-	-	-	-	4,3	45,5

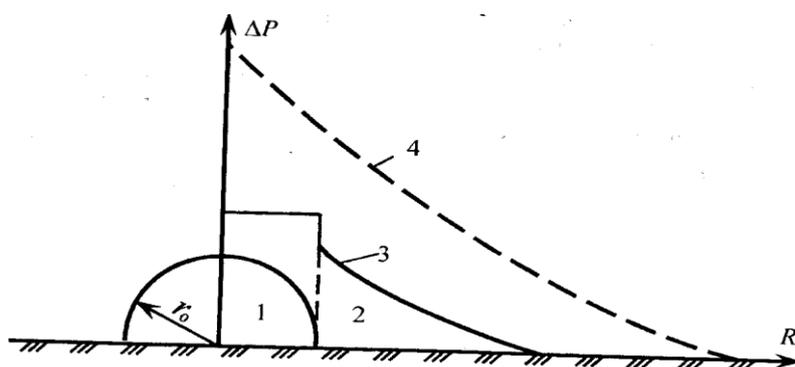
Что же касается метана, широко используемого в промышленности, то считается установленным, что этот продукт в неограниченном пространстве взрывается весьма редко, поскольку он не образует стабильных облаков вблизи поверхности земли. Его детонация возможна в ограниченных объемах в результате разлития и воспламенения, а также при инициировании взрывов ВВ.

Детонация смеси водорода с воздухом происходит при инициировании взрывом всего одного грамма тротила, что меньше, чем требуется для инициирования углеводородов, включая метан.

Детонационную волну в газах представляют как ударную волну, сопровождаемую волной горения. В отличие от дефлаграционного, данный процесс связан с разогревом газа ударной волной до температуры, обеспечивающей высокую скорость реакции и скорость распространения пламени со скоростью ударной волны.

Учитывая высокую скорость детонации (тысячи метров в секунду) сформировавшееся при быстром

испарении облако ГПВС в целях расчета считают неизменным за весь период распространения фронта волны до внешней границы облака, схематизируемого полусферой радиуса r_0 , с центром на поверхности грунта (рисунок 42), совмещенным с источником инициирования. Давление на фронте детонационной волны в газовых смесях может достигать 2 МПа, а при взаимодействии с конструкциями в помещениях вследствие многократных отражений - доходить до 10 МПа.



1 – область облака ГПВС с радиусом r_0 ; 2 - зона разлета

продуктов детонации и ударной воздушной волны ($R > r_0$);

3 – изменение давлений для взрыва ГПВС; 4 – изменение давлений взрыва конденсированного ВВ

Рисунок 42. Схема взрыва ГПВС и изменения давлений ΔP по координате R

Параметры детонационной волны в процессе распространения в пределах облака существенно не меняются. При выходе за пределы границы облака расширяющиеся продукты детонации (ПД) возбуждают воздушную ударную волну.

Поскольку при выбросах не все количество жидкого продукта переходит в облако, к расчетному значению массы продукта вводят коэффициент $v \leq 1$. На рисунке 42 схематически показано изменение максимума давления по координате при ГПВС в сравнении со взрывом заряда конденсированного ВВ.

Для расчета поражающего действия взрывов ГПВС определяют параметры детонационной волны расширяющихся ПД и воздушной ударной волны.

Начальный радиус r_0 , м, полусферического облака ГПВС в зависимости от его объема $V_0, \text{м}^3$ определяют по формуле:

$$r_0 = \sqrt[3]{3v_0/(2\pi)}. \quad (76)$$

Поскольку согласно закону Авогадро киломоль μ_r идеального газа занимает объем $V_a = 22,4 \text{м}^3$, для газовой смеси стехиометрического состава с объемной концентрацией $C_{\text{стх}}$ и молекулярной массой μ_r горючей компоненты массы C_B запишем приближенную формулу для объема облака :

$$V_0 = V_a \cdot Q_1 \cdot C_B / (\mu_r \cdot C_{\text{стх}}). \quad (77)$$

Значение коэффициента Q_1 принимают в зависимости от способа хранения продукта: $Q_1=1$ - для газов при атмосферном давлении; 0,5 - для газов, сжиженных под давлением; 0,1 - для газов, сжиженных охлаждением; 0,02-0,07 - при растекании легко-воспламеняющихся жидкостей.

При взрыве детонационная волна распространяется со скоростью D , м/с:

$$D = \sqrt{2(\gamma^2 - 1) \cdot Q_m}, \quad (78)$$

где Q_m – теплота взрыва, Дж/кг; γ – показатель адиабаты.

Время полной детонации облака t_B , с, равно:

$$t_B = r_0 / D. \quad (79)$$

Максимум избыточного давления на фронте детонационной волны (химический пик):

$$\Delta P_1 = (\gamma - 1) \cdot Q_m \cdot \rho_{стx} - p_0.$$

Через весьма малый интервал времени τ давление в детонационной волне уменьшается в два раза (так называемая точка Жуге):

$$\Delta P_2 = 2(\gamma - 1) \cdot Q_m \cdot \rho_{стx} - P_0 = \rho_{стx} \cdot D^2 / (\gamma + 1) - P_0. \quad (80)$$

Время τ порядка десятков микросекунд – длительность превращений в зоне химической реакции, т.е. перехода от адиабаты исходного вещества к адиабате продуктов детонации.

Изменение избыточного давления во времени для детонационной волны на расстоянии $R \leq r_0$, м, от центра взрыва аппроксимируют треугольником.

При наличии плоской вертикальной преграды давление нормального отражения $\Delta P_{отр}$ при $R \leq r_0$ определяется по формуле $\Delta P_{отр} = 2,5 \cdot \Delta P_2$.

Характеристики распространенных газо- и паровоздушных смесей: ΔP_2 – избыточное давление детонационной волны (эффективное давление); $\gamma_{стx}$ – показатель адиабаты продуктов детонации; $\rho_{стx}$ – плотность; $Q_{m,стx}$ и $Q_{v,стx}$ – теплота взрыва единицы

массы и единицы объема смеси, а индексом «стх» помечен стехиометрический состав - приводятся в работе [118].

Параметры ударной волны на расстояниях, превышающих начальный размер облака $R \geq r_0$, м, определим по формулам, аппроксимирующим численное решение задачи о детонации пропановоздушной смеси [119]. Решение получено интегрированием системы нестационарных уравнений газовой динамики в сферических координатах в переменных Лагранжа. Используются достаточно реалистичные уравнения состояния исходной смеси, продуктов детонации и соотношения для скорости реагирования смеси в зоне реакции.

Полученные универсальные зависимости максимума эффективного избыточного давления ΔP_m , Па, и удельного импульса I , Па·с, в ударных волнах от расстояния R до центра взрыва в энергетических координатах удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными для горючих углеводородов с воздухом или кислородом, независимо от состава смеси:

$$\Delta P_m = P_0 \cdot \bar{P}. \quad (81)$$

$$\lg \bar{P} = 0,65 - 2,18 \cdot \lg \bar{R} + 0,52(\lg \bar{R})^2, \\ \bar{R} = R / \sqrt[3]{m_T} \quad (82)$$

$$I = \bar{I} \cdot \sqrt[3]{m_T}, \quad (83)$$

$$\lg \bar{I} = 2,11 - 0,97 \cdot \lg \bar{R} + 0,44(\lg \bar{R}). \quad (84)$$

Здесь m_T - тротильный эквивалент наземного взрыва полусферического облака ГПВС, кг.

$$m_T = 2 \cdot m \cdot Q_{m, \text{стх}} / Q_T, \quad (85)$$

где $m = \rho_{\text{стх}} \cdot V_0$ – масса горючего облака, кг; Q_T – теплота взрыва тротила (принята $4,184 \cdot 10^6$ Дж/кг); P_0 – атмосферное давление, Па.

Для сшивания параметров на границе облака величина R_0 заменяется на близкое значение R_0 , определяемое из условия непрерывности функции $\Delta P_M(R)$ в точке $R = R_0$:

$$R_0 = 10^a \cdot \sqrt[3]{m_T}, a = K_1 - \sqrt{K_1^2 - A}, \quad (86)$$

$$K_1 = 1,09/0,52; A = 1,25 - \lg(\Delta P_2/P_0)/0,52.$$

Значение импульса при $R \leq E_0$ принимается равным $I(R_0)$ из уравнения (83).

Эффективное время θ, c , действия фазы сжатия ударной волны с давлением, аппроксимируемым треугольником $\Delta P(t) = \Delta P_M(1 - t/\theta)$, определяется по формуле:

$$\theta = 2 \cdot I / \Delta P_m \quad (87)$$

Пример 4.

Взрыв облака ГПВС, образованного при разрушении резервуара с 10^6 кг сжиженного пропана. Исходные данные: $S_v = 10^6$ кг; $\theta_1 = 0,5$; $C_{\text{стх}} = 4,03\%$; $Q_{m, \text{стх}} = 2,801 \cdot 10^6$ Дж/кг; $\mu_T = 44$; $\gamma = 1,257$; $\rho_{\text{стх}} = 1,315$ кг/м³; $p_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па.

Объем ГПВС по формуле (77):

$$V_0 = 22,4 - 0,5 \cdot 10^6 / (44 - 0,0403) = 6,316 \cdot 10^3 \text{ м}^3$$

Параметры детонационной волны:

$$D = \sqrt{2(1,257^2 - 1) \cdot 2,801 \cdot 10^6} = 1,8 \cdot 10^3 \text{ м/с} ;$$

$$\Delta P_2 = 1,315 \cdot (1,8 \cdot 10^3)^2 / (1,257 + 1) - 1,013 \cdot 10^5 = 17,9 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Параметры ударной волны при $R > r_0$ определяем по формулам (81-87):

$$m = 1,315 \cdot 6,316 \cdot 10^6 = 8,31 \cdot 10^6 \text{ кг};$$

$$m_T = 2 \cdot 8,31 \cdot 10^6 \cdot 2,801 \cdot 10^6 / (4,184 \cdot 10^6) = 1,11 \cdot 10^7 \text{ кг};$$

$$A = 1,25 - \lg(17,9 \cdot 10^5 / 1,013 \cdot 10^5) / 0,52 = -1,149;$$

$$K_1 = 2,096; a = 2,096 - \sqrt{2,096^2 + 1,149} = -0,258;$$

$$R_0 = 10^{-0,258} \cdot \sqrt[3]{1,11 \cdot 10^7} = 123 \text{ м};$$

$$\bar{R}_0 = 123 / \bar{R}_0 = 123 \sqrt[3]{1,11 \cdot 10^7} = 0,551 \text{ м} / \kappa z^{1/3};$$

удельный импульс на расстоянии R_0 :

$$\lg I_0 = 2,11 - 0,97 \cdot \lg 0,551 + 0,04 (\lg 0,551)^2 = 2,364;$$

$$\bar{I}_0 = 231 \text{ Па} \cdot \text{с} / \kappa z^{1/3}; I_0 = 231 \cdot \sqrt[3]{1,11 \cdot 10^7} = 5,15 \cdot 10^4 \text{ Па} \cdot \text{с};$$

эффективное время фазы сжатия:

$$\theta_0 = 2 \cdot 5,15 \cdot 10^4 / (17,9 \cdot 10^5) = 0,0575 \text{ с}.$$

Определяем параметры ударной волны на расстоянии $R = 200 \text{ м}$ от центра взрыва ($R > R_0$):

$$\bar{R} = 200 / \sqrt[3]{1,11 \cdot 10^7} = 0,897 \text{ м} / \kappa z^{1/3};$$

$$\lg \bar{P} = 0,65 - 2,18 \cdot \lg 0,897 + 0,52 (\lg 0,897)^2 = 0,754;$$

$$\bar{P} = 10^{0,754} = 5,675; \quad \Delta P_M = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

$$5,675 = 5,76 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$\bar{I} = 10^{2,156} = 143,2; \quad I = 143,2 \sqrt[3]{1,11 \cdot 10^7} = 3,19 \cdot 10^4 \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$\Theta = 2 \cdot 3,19 \cdot 10^4 / (5,76 \cdot 10^5) = 0,11 \text{ с}.$$

Зависимости $\Delta P(R)$ и $I(R)$ приведены на рисунке 43.

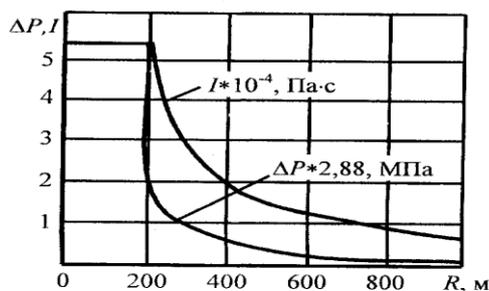


Рисунок 43. Зависимости $\Delta P(R)$ и $I(R)$ к расчету взрыва пропановоздушного облака при разливе 1000 т сжиженного пропана

7.2 Определение параметров взрыва при дефлаграционном горении газопаровоздушных смесей

При аварийном вскрытии хранилищ, выбросе и интенсивном испарении сжиженного углеводородного топлива с образованием газопаровоздушных облаков (ГПВС) возможно их воспламенение, быстрое сгорание (дефлаграция), а также детонационный взрыв. Возможный сценарий аварии, зависящий от большого числа случайных факторов, предвидеть практически невозможно, и на практике указанные процессы рассматриваются отдельно.

Эффективный энергозапас горючей смеси определяется по соотношению:

$$E = M_z \cdot g_z \text{ при } C_z \leq C_{стх} \quad (88)$$

$$E = M_z \cdot g_z \cdot C_{стх} / C_z \text{ при } C_z > C_{стх},$$

где E – эффективный энергозапас ГПВС, МДж;

M_z – масса горючего газа, содержащегося в облаке ПВС, кг;

g_z - удельная теплота сгорания газа, МДж/кг;
 C_z - концентрация горючего газа в смеси, кг/м³;
 $C_{стх}$ - стехиометрическая концентрация вещества в смеси с воздухом, кг/м³.

При расчете параметров взрыва облака, лежащего на поверхности земли, величина эффективного энергозапаса удваивается. Для объема газового облака ГПВС можно воспользоваться простым соотношением: $V_0 = M_z / C_{стх}$.

При назначении параметров необходимо учитывать следующее:

- стехиометрическая концентрация горючего ГПВС определяется из справочных данных или рассчитывается отдельно. Для перевода концентрации из объемных долей в единицы [кг/м³] используется соотношение: $C, [кг/м^3] = 0,01 \cdot C, [\% об] \cdot q_z$;

- в случае, если определение концентрации горючего газа в смеси затруднено, в качестве величины C_z в соотношении (88) принимается концентрация, соответствующая нижнему концентрационному пределу воспламенения горючего газа;

- теплота сгорания горючего газа q_z в ГПВС берется из справочных данных или оценивается по формуле:

$$q_z = 44 \cdot \beta, \text{ МДж/кг} \quad (89)$$

где β - корректировочный параметр наиболее распространённых в промышленном производстве опасных веществ, который определяется из таблицы 25.

Таблица 25.

Классификация горючих смесей по степени чувствительности [120]

Класс 1		Класс 2		Класс 3		Класс 4	
	β		β		β		β
1	2	3	4	5	6	7	8
ацетилен	1,1	акрило-нит	-	ацетальдегид	0,56	аммиак	0,42
винилацетилен	1,03	акролеин	0,62	ацетон	0,65	бензол	0,88
водород	2,72	бутан	1,04	бензин	1	дизтопливо	1
гидразин	0,44	бутилен	1	винилацетат	0,51	декан	1
изопропилнитрат	0,41	бутадиен	1	винилхлорид	0,42	О-дихлорбензол	0,42
метилацетилен	1,05	1,3 пентадиен	1	гексан	1	додекан	1
нитрометан	0,25	пропилен	1,04	генераторный газ	-	керосин	1
окись пропилена	-	пропан	1,05	изооктан	1	метан	1,14
окись этилена этилнитрат	0,3	этан	1,08	метилацетат	-	метилмеркаптан	1
		этилен	1,07	метилбутидикетон	-	метилхлорид	-
		окись пропилена ШФЛУ	1	метилэтилкетон	-	окись углерода	0,23
		эфиры:		октан	-	фенол	-
		диметиловый	0,66	пиридин	0,77	хлорбензол	-
		дивиниловый	0,77	сероводород	0,34	дихлорэтан	0,25

продолжение таблицы 25

1	2	3	4	5	6	7	8
		метилбутиловый	-	спирты:		трихлорэтан	0,14
		диэтиловый	0,8	метиловый	0,52		
		диизоприловый	0,82	пропиловый	0,69		
				амиловый	-		
				изобутиловый	0,79		
				изопропиловый	1		
				циклогексан	-		
				этилформиат	1		
				этилхлорид	0,84		
				СПГ	0,09		
				кумол	1		
				печной газ	0,8		
				циклопропан			
				этиламин			

ГПВС, способные к образованию горючих смесей с воздухом, по своим взрывоопасным свойствам разделены на четыре класса. Классификация горючих веществ приведена в таблице 25.

В случае, если вещество отсутствует в таблице 25, его следует классифицировать по аналогии с имеющимися в списке веществами, а при отсутствии информации о свойствах данного вещества относить его к классу 1, т.е. рассматривать наиболее опасный случай.

В связи с тем, что характер окружающего пространства в значительной степени определяет скорость взрывного превращения облака ГПВС и,

следовательно, параметры ударной волны, геометрические характеристики окружающего пространства разделены на виды в соответствии со степенью их загроможденности.

Вид 1. Наличие длинных труб, полостей, заполненных горючей смесью, при сгорании которой возможно ожидать формирование турбулентных струй продуктов сгорания с размером не менее трех размеров детонационной ячейки данной смеси.

Вид 2. Сильно загроможденное пространство: наличие полузамкнутых объемов, высокая плотность размещения технологического оборудования, лес, большое количество повторяющихся препятствий.

Вид 3. Средне загроможденное пространство: отдельно стоящие технологические установки, парк.

Вид 4. Слабо загроможденное и свободное пространство.

Известны два основных режима протекания быстропротекающих процессов - детонация и дефлаграция. Для оценки параметров действия взрыва возможные режимы взрывного превращения ГПВС разбиты на шесть диапазонов по скоростям их распространения, причем пять из них приходятся на процессы дефлаграционного горения ГПВС, поскольку характеристики процесса горения со скоростями, меньшими 500 м/с, имеют существенные качественные различия.

Ожидаемый диапазон скоростей взрывного превращения определяется с помощью экспертной таблицы 26, в зависимости от класса горючего и вида окружающего пространства [120].

Таблица 26

Экспертная таблица для определения режима взрывного превращения

Класс смеси	Вид окружающего пространства			
	1	2	3	4
	Ожидаемый диапазон скорости взрывного превращения			
1	1	1	2	2
2	1	2	3	4
3	2	3	4	5
4	3	4	5	6

Ниже приводится разбиение режимов взрывного превращения ГПВС по диапазонам скоростей.

Диапазон 1. Детонация или горение со скоростью фронта пламени 500 м/с и больше.

Диапазон 2. Дефлаграция, скорость фронта пламени 300-500 м/с.

Диапазон 3. Дефлаграция, скорость фронта пламени 200-300 м/с.

Диапазон 4. Дефлаграция, скорость фронта пламени 150-200 м/с.

Диапазон 5. Дефлаграция, скорость фронта пламени определяется соотношением:

$$V_z = k_1 \cdot M_z^{1/6} \quad (90)$$

где k_1 - константа, равная 43.

Диапазон 6. Дефлаграция, скорость фронта пламени определяется соотношением:

$$V_z = k_2 \cdot M^{1/6} \quad (91)$$

где k_2 - константа, равная 26.

После того, как определен вероятный режим

взрывного превращения, рассчитываются основные параметры воздушных ударных волн (избыточное давление ΔP и импульс фазы сжатия I) в зависимости от расстояния от центра облака.

В случае дефлаграционного взрывного превращения облака ГПВС, к параметрам, влияющим на величины избыточного давления и импульса положительной фазы, добавляются скорость видимого фронта пламени (V_z) и степень расширения продуктов сгорания (ε). Для газовых смесей принимается $\varepsilon=7$, для гетерогенных $\varepsilon=4$. Для параметров ударной волны при дефлаграции гетерогенных облаков величина эффективного энергозапаса домножается на коэффициент $x=(\varepsilon-1)/\varepsilon$.

Безразмерные давление P_{x1} и импульс фазы сжатия I_{x1} определяются по соотношениям:

$$P_{x1}=(V/C_0)^2((\varepsilon-1/\varepsilon))(0,83/R_x-0,14\cdot R_x^2) \quad (92)$$

$$I_{x1}=(V_z/C_0)((\varepsilon-1)/\varepsilon)(1-0,4(\varepsilon-1)\cdot V_z/(\varepsilon\cdot C_0))x,$$

$$x(0,06/R_x+0,01/R_x^2-0,0025/R_x^3), \quad (93)$$

где C_0 - скорость звука в воздухе, м/с.

Для вычисления параметров воздушной ударной волны на заданном расстоянии от центра облака R при взрывном горении облака ГПВС предварительно рассчитывается соответствующий безразмерный радиус по соотношению:

$$R_x=R/(10\cdot E/P_0)^{1/3} \quad (94)$$

Выражения (92) и (93) справедливы для значений R_x , больших величины $R_{пр} = 0,34$, в противном случае вместо R_x в соотношение (92) и (93) подставляется

величина $R_{пр}$.

После определения безразмерных величин давления и импульса фазы сжатия, вычисляются соответствующие им размерные величины:

$$\Delta P = P_x \cdot P_0 \quad (95)$$

$$I = 100 \cdot I_x \cdot (0,1 \cdot P_0)^{2/3} \cdot E^{1/3} / C_0 \quad (96)$$

При расчетах предполагается, что гетерогенной смесью считается смесь, если более 50% топлива содержится в виде капель, в противном случае ГПВС считается газовой. Провести такие оценки можно, исходя из величины давления насыщенных паров топлива при данной температуре и времени формирования облака. Для летучих веществ, таких как пропан, при температуре +20°C смесь можно считать газовой, а для веществ с низким давлением насыщенного пара (распыл дизтоплива при +20°C) расчеты проводятся в предположении гетерогенной смеси.

7.3 Особенности поражающего действия воздушной ударной волны на различные объекты

Воздушная ударная волна вызывает разрушения или повреждение зданий городской застройки, промышленных зданий и сооружений, систем электро-, газо- и водоснабжения, транспортных средств. Степень разрушения определяется мощностью взрыва, расстоянием до центра взрыва, характеристиками объекта, а также условиями взаимодействия с ним ударной волны.

Различают четыре степени разрушений зданий и

объектов: полное, сильное, среднее и слабое. При полном разрушении обрушивается большая часть стен, колонн и перекрытий. Сильное – характеризуется частичным разрушением стен (колонн) и перекрытий: легкие элементы (двери, перегородки, крыши) разрушаются полностью или частично. Среднее разрушение определяется тем, что основные ограждающие и несущие конструкции получают деформации (прогибы), а разрушаются, в основном, второстепенные конструкции. Слабое разрушение соответствует повреждению или серьезным деформациям отдельных легких элементов ограждения (окна, двери, крыши домов). Полное разрушение на сетях коммунально-энергетического хозяйства характеризуется выходом из строя значительных участков трубопроводов, разрывом кабеля, обрушением опор воздушных линий электропередач.

Результат воздействия ударной волны на различные конструкции зависит от давления на фронте волны ΔP_{ϕ} и импульса I или длительности фазы сжатия τ_t а также от жесткостных, массовых и прочностных конструкций.

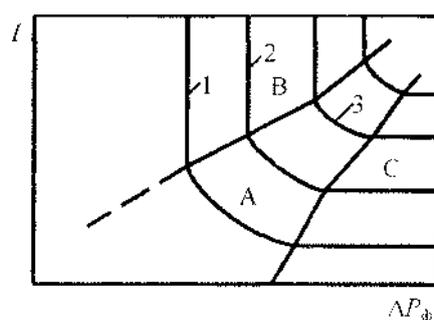


Рисунок 44. Схема диаграммы поражения ударной волной объекта

Для объектов конкретного типа результат воздействия можно представить на плоскости $1-\Delta P_{\phi}$ (рисунок 44) с областями, разграниченными линиями различных степеней повреждений. Как показывает опыт, лишь небольшая зона (А - на рисунке) характеризуется зависимостью как от давления, так и от импульса. Остальная часть плоскости занята асимптотическими прямыми $\Delta P_{\phi} = \text{const}$ (зона В), в которой влияние импульса весьма мало или отсутствует вовсе, и прямыми $I = \text{const}$ (зона С), где не ощущается влияние давления. Т.е. в зоне В, в которой длительность τ_t давления значительно больше времени τ релаксации объекта ($\tau_t/\tau \gg 1$) результат воздействия определяется только давлением ΔP_{ϕ} , а в зоне С ($\tau_t/\tau \gg 1$) – только импульсом I . Величина τ здесь представляет оценку времени достижения конструкцией экстремумов напряженно-деформированного состояния. Для упругих систем τ можно сопоставить периоду T собственных колебаний.

Границы различных степеней разрушений зданий по результатам бомбардировок аппроксимированы в Великобритании уравнением [121]:

$$R = K \cdot C^{1/3} \cdot [1 + (3180/C)^2]^{-1/6}, \quad (97)$$

где R - расстояние, м;

C - масса заряда ВВ, кг тротилового эквивалент;

K - коэффициент, равный:

3,8 - для полного разрушения зданий;

5,6 - 50% зданий полностью разрушено;

9,6 - здания непригодны для обитания;

28 - умеренные разрушения, повреждения внутренних малопрочных перегородок;

56 - малые повреждения зданий, разбито 10%

стекло.

Переход от расчетов по формуле (97) к диаграмме (рисунок 44) осуществляется посредством соотношений, связывающих параметры ударной волны с величинами R и C . Зависимости давления ΔP_{ϕ} , МПа, скоростного напора $P_{ск}$, МПа, и импульса I , кПа·с, от расстояния R , и массы заряда $ВВ$ C , кг, таковы:

$$\Delta P_{\phi} = \frac{0,084}{R} + \frac{0,27}{R^2} + \frac{0,7}{R^3} \cdot \bar{R} = R/\sqrt[3]{C} \quad (98)$$

$$P_{ск} = 2,5 \cdot \Delta P_{\phi} \cdot \Delta P'_{\phi} / (\Delta P'_{\phi} + 7), \Delta P'_{\phi} = \Delta P_{\phi} / P_0 \quad (99)$$

$$I = 0,4 \cdot C^{2/3} / R. \quad (100)$$

При взрыве зона действия продуктов детонации, расширяясь, достигает примерно пятнадцати радиусов заряда (рисунок 45).



Рисунок 45. Зависимость скоростей ударного фронта, массового потока и фронта продуктов детонации от приведенного расстояния при взрыве заряда тротила в воздухе

Для условий взрыва в воздухе бризантного $ВВ$ в диапазоне больших давлений за пределами заряда

давление на фронте взрывной волны определяется по формуле:

$$\Delta P_{\phi} = \frac{3(\gamma-1)}{2} \cdot \rho_0 \cdot Q \cdot \left(\frac{r_0}{R}\right)^3 \quad (101)$$

где r_0 - радиус заряда; Q - теплота взрыва;
 ρ_0 - плотность ВВ; γ - показатель адиабаты.

Принимая средние параметры для тротила и подставляя выражение для радиуса заряда, приведенного к сфере $r_0 = \sqrt[3]{3 \cdot C / (4\pi \cdot \rho_0)}$, запишем формулу для давления ΔP_{ϕ} , Па:

$$\Delta P_{\phi} = 6,7 \cdot 10^5 / \bar{R}^3, \bar{R} = R / \sqrt[3]{C}, (R \gg r_0).$$

Данная функция проходит несколько ниже зависимости (98), применяемой для диапазона умеренных давлений, не пересекаясь с ней. В диапазоне высоких давлений различие невелико. Так, при $\bar{R} = 0,1$ и $\Delta P_{\phi} = 670$ МПа формула (98) дает завышение давления всего лишь на 5,5%, причем ошибка меняется с ростом давления, во всем диапазоне $R > r_0$, будет использована формула (98).

Удельный импульс I , Па·с, в диапазоне высоких параметров можно определить, используя соотношение для потока импульса на границе заряда радиуса r_0 :

$$I = \frac{32}{27} \cdot \sqrt{C \cdot E} / (4\pi r_0^2), E = C \cdot Q$$

На расстоянии R от центра взрыва следует учесть массу вовлекаемого в движение воздуха с плотностью ρ_B . Заменяя Q на скорость детонации $Q \cong D^2/16$, получим:

$$I = \frac{2 \cdot C \cdot D}{27 \cdot \pi \cdot R^2} \sqrt{1 + \frac{\rho_B}{\rho_0} \left(\frac{R^3}{r_0^3} - 1\right)}$$

Подставив значения $\rho_B/\rho_0 = 1/1250$, для зарядов тротила:

$$I = 170 \cdot \frac{C}{R^2} \sqrt{1 + \frac{1}{1,25 \cdot 10^3} \left(\frac{R^3}{r_0^3} - 1 \right)}, (r_0 \ll R \ll 15 \cdot r_0).$$

Для ВВ с плотностью $\rho_0 = 1600 \text{ кг/м}^3$:

$$I = 170 \cdot \frac{C}{R^2} \sqrt{1 + \frac{1}{1,25 \cdot 10^3} (6,702 \cdot 10^3 \cdot \bar{R}^{-3} - 1)}, (0,053 \leq \bar{R} \leq 0,8) \quad (102)$$

Для больших расстояний R , м, (несколько десятков километров) избыточное давление ΔP_* , МПа, отраженной от земли ударной волны с эквивалентом C , кг, может быть определена по формуле:

$$\Delta P_* = 0,727 \cdot C^{0,4} \cdot R^{-1,2} \cdot (10 \cdot P_0)^{0,6} \cdot F \quad (103)$$

Здесь P_0 - атмосферное давление, МПа; $F \approx 3,3$ - коэффициент усиления ударной волны, связанный с атмосферными волноводами и фокусировкой вследствие температурной инверсии приземного слоя воздуха и струйных ветровых потоков в атмосфере. Значение $F = 3,3$ было зарегистрировано на расстоянии 225 км от взрыва 15 т ВВ.

На рисунке 46 приведена диаграмма повреждения кирпичных зданий. Асимптотические значения границ областей различных степеней повреждений W зданий приведены в таблице 27.

При расчетах с использованием диаграммы ΔP_ϕ -1 степень повреждения здания W определяется линейной интерполяцией между значениями, соответствующими границам области, в которую попадают действующие на объект давление и импульс.

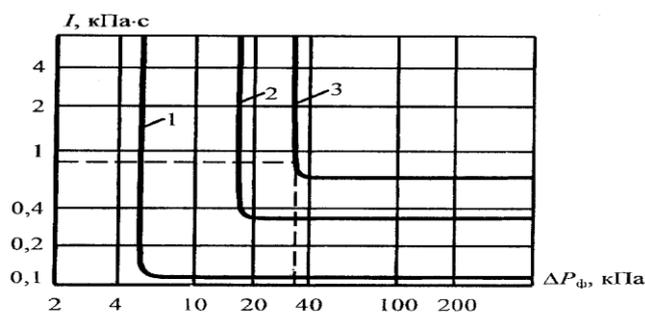


Рисунок 46 Экспериментальная диаграмма повреждения кирпичных зданий

Таблица 27

Асимптотические значения границ областей различных степеней повреждений

Повреждения	ΔP_{ϕ} , кПа	I, кПа·с	W
1	2	3	4
1. Минимальные повреждения (разрыв соединений, расчленение конструкций)	4,5	0,12	0,15
2. Значительные повреждения элементов, несущих нагрузку	18,0	0,30	0,4
3. Частичное разрушение (50-70% стен разрушено или на грани разрушения)	40,0	0,50	0,8

Пример 5.

При взрыве заряда $q=1200$ кг на расстоянии $R=50$ м параметры, подсчитанные по формулам (98-100), $\Delta P_{\phi}=36,8$ кПа, $I=0,903$ кПа·с попадают в зону В между предельными кривыми 2 и 3 с давлениями $\Delta P_2=18$ и $\Delta P_3=40$ кПа и импульсами $I_2=0,3$ и $I_3=0,5$ кПа·с.

При интерполяции по шкале давлений:

$$W = W_2 + (\Delta P_{\phi} - \Delta P_2)(W_3 - W_2)/(\Delta P_3 - \Delta P_2) = 0,4 + (36,8 - 18,0)(0,8 - 0,4)/(40 - 18) = 0,742$$

Для сравнения: при $R=50$ м, $C=1200$ кг (97)

дает значение $K = 6,66$, что соответствует несколько менее 50% полностью разрушенных зданий.

В целях прогноза взрывного воздействия на конструкции здания в работе [121] предложена $\bar{P} - \bar{I}$ диаграмма для определения упруго-пластических деформации балок с диаграммой сопротивления по Прандтлю при динамической нагрузке, равномерно распределенной по пролету (рисунок 47).

Диаграмма представляет соотношение между безразмерными параметрами $\bar{\varepsilon}$ (\bar{P} , \bar{I}), определяемыми по формулам:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_m \cdot EJ}{\varphi_\varepsilon \cdot h \cdot \sigma_T \cdot z}, \bar{P} = \frac{p \cdot b \cdot L^2}{\varphi_P \cdot \sigma_T \cdot z}, I = \frac{b \cdot I \cdot \sqrt{EJ}}{\varphi_i \cdot \sigma_T \cdot z \cdot \sqrt{\rho \cdot A}} \quad (104)$$

Здесь ε_m - максимум деформации конструкции; P , I - динамическое давление и удельный импульс ударной волны; L, A, R - пролет балки, площадь и высота поперечного сечения; J - момент инерции сечения; z - его пластический момент сопротивления; E, ρ, σ_E - модуль упругости, плотность и предел текучести материала.

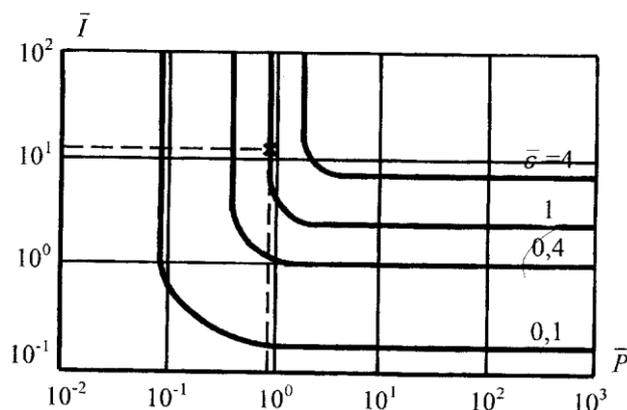


Рисунок 47. Диаграмма для упругопластических деформаций балок при динамическом изгибе под действием взрывной нагрузки

Максимум прогиба вычисляется через деформацию:

$$U_m = \varphi_y \cdot \varepsilon_m \cdot L^2 / h \quad (105)$$

Параметры φ_p , φ_i , φ_ε , φ_y зависят от типа опорных закреплений и приведены в таблице 28.

Таблица 28

Параметры φ_p , φ_i , φ_ε , φ_y для различных типов опорных закреплений

Опираие концов	φ_p	φ_i	φ_ε	φ_y
1	2	3	4	5
1. Шарнир-шарнир	10,00	0,913	1,250	0,2083
2. Защемлен-защемлен	23,10	0,861	1,925	0,0625
3. Защемлен-шарнир	15,83	0,885	1,979	0,0867
4. Защемлен-свободен	3,33	0,577	1,000	0,5000

Асимптотические значения диаграммы $\bar{P} - \bar{I}$ приведены в таблице 29.

Таблица 29.

Зависимости между безразмерными параметрами диаграммы $\bar{P} - \bar{I}$ (асимптотические значения)

i	1	2	3	4	5	6	7
P	0,093	0,168	0,305	0,435	0,57	0,78	1,0
I	0,193	0,365	0,750	1,130	1,50	2,40	3,8
ε	0,10	0,20	0,40	0,70	1,0	2,0	4,0

Пример 6.

Алгоритм вычислений проиллюстрируем динамическим анализом двутавровой балки №20 с шарнирным опиранием концов. Данные

конструкции: $L = 3\text{м}$, $b = 0,1\text{м}$, $h = 0,2\text{м}$, $A = 2,68 \cdot 10^{-3}\text{м}^2$, $J = 1,84 \cdot 10^{-5}\text{м}^4$, момент сопротивления упругого сечения $W = 1,84 \cdot 10^{-4}\text{м}^3$, $z = 1,5 \cdot W = 2,76 \cdot 10^{-4}\text{м}^3$, $E = 2 \cdot 10^{11}\text{Па}$, $\sigma = 3 \cdot 10^8\text{Па}$, $\rho = 7800\text{кг/м}^3$. Предельный упругий прогиб балки при $\varepsilon = \sigma_T/E = 3 \cdot 10^8/(2 \cdot 10^{11}) = 1,5 \cdot 10^{-3} = 0,15\%$.

$$U_y = 0,2083 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 3^2/0,2 = 1,406 \cdot 10^{-2}\text{м}$$

Превышение этого значения будет означать работу конструкции за пределом текучести.

Рассмотрим действие динамической нагрузки от взрыва облака ГПВС, образованного при разрушении резервуара с 10^6кг сжиженного пропана. Расчет параметров поля выполнен в примере 4. Так, на расстоянии $R = 200\text{м}$ от взрыва давление в ударной волне $\Delta P_\phi = 5,76 \cdot 10^5\text{Па}$, а удельный импульс $I = 3,19 \cdot 10^4\text{Па}\cdot\text{с}$. Приведенные к безразмерному виду величины:

$$\bar{P} = 0,626, \bar{I} = \frac{0,1 \cdot 3,19 \cdot 10^4}{0,903 \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 2,76 \cdot 10^{-3}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{11} \cdot 1,84 \cdot 10^{-5}}{7800 \cdot 2,68 \cdot 10^{-3}}} = 17,71.$$

По диаграмме (рисунок 47) находим, что значения \bar{P} , \bar{I} попадают в область, ограниченную величинами $\bar{\varepsilon} = 1$ и 2 , что показано звездочкой *. Интерполируя, с учетом данных таблицы 29 найдем деформацию ε_m и прогиб U_m конструкции:

$$\bar{\varepsilon} = 1 + (0,626 - 0,57)(2 - 1) / (0,78 - 0,57) = 1,267,$$

$$\varepsilon_m = \bar{\varepsilon} \cdot \varphi_\varepsilon \cdot h \cdot z \cdot \sigma_T / (E \cdot I) = 1,267 \cdot 1,25 \cdot 0,2 \cdot 2,76 \cdot 10^4 \cdot 3 \cdot 10^8 / (2 \cdot 10^{11} \cdot 1,84 \cdot 10^{-5}) = 7,13 \cdot 10^{-3} = 0,713\%,$$

$$U_m = 0,2083 \cdot 7,13 \cdot 10^{-3} \cdot 3^2/0,2 = 6,68 \cdot 10^{-2}\text{м},$$

т.к. балка получила $n = U_m/U_y = 4,8$ упругих прогиба, а отношение прогиба к пролету составило $U_m/L = 2,23 \cdot 10^{-2}$.

Наиболее достоверные данные о возможных

разрушениях объекта получают его динамическим расчетом. Такой прочностной расчет проводят для особо ответственных сооружений с фиксацией мощности и положения центра взрыва. Возможно также использование приближенных инженерных методов расчета на эквивалентные статические нагрузки, устанавливаемые с помощью коэффициентов динамичности. Коэффициенты динамичности определяют по параметрам ударной волны и основной частоте собственных колебаний конструкции ω , т.е. по величине, обратной периоду T .

Периоды собственных колебаний зданий с жесткой конструктивной схемой оценивают по эмпирическим формулам в зависимости от различных параметров. Следующие формулы для T дают ориентировочные значения [123]:

$$T = \alpha_1 \cdot n; T = 0,017 \cdot H; T = 0,0905 - H / \sqrt{B}; T = 0,3H / \sqrt{B \cdot g}$$

Здесь n - число этажей; α - коэффициент, зависящий от конструкции здания и средней плотности грунтов основания ($\alpha_1=0,04-0,09$); H - высота здания, м; B - ширина или длина здания, м; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ - ускорение свободного падения. Опытные значения периодов T для различных типов зданий и сооружений приведены в таблице 30.

Таблица 30.

Периоды собственных колебаний зданий и сооружений

Здание	Число этажей	Поперечные $T, \text{с}$	Продольные $T, \text{с}$
1	2	3	4
1. Жилое с несущими каменными стенами	3	0,15	0,16
	5	0,26	0,22

продолжение таблицы 30

1	2	3	4
2. Школьное с несущими кирпичными стенами	6	0,38	-
	8	,043	0,43
	3	0,22	0,21
	4	0,30	0,27
	5	0,32	-
3. Жилое крупнопанельное	4	0,16	0,15
	5	0,30	0,22
	6	0,36	-
	9	0,40	0,32
4. Жилое сборное каркасно-панельное	14	0,86	0,76
	16	1,20	0,76
5. Жилое с нижним каркасным и верхними крупнопанельными этажами	4	0,228	0,30
	10	0,64	1,14
	18	0,44	1,05
6. Административное каркасное с кирпичным заполнением:			
- железобетонный каркас	12	0,69-0,96	0,62-0,89
- стальной каркас	12	1,17	1,12
7. Административное каркасное	22	1,10	1,16

Для крупных взрывов, когда допустима оценка степени повреждения по давлению, ориентируются на значения ΔP_{ϕ} , приведенные в таблице 31.

Для оценки возможных последствий ударной волны на объект ΔP^*_{ϕ} корректируют с помощью коэффициентов K_1, K_2, K_3 :

$$\Delta P_{\phi} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \Delta P^*_{\phi},$$

где ΔP_{ϕ} - расчетное давление, сопоставляемое с данными таблицы 31; K_1 - коэффициент ориентации объекта на центр возможного взрыва; K_2 - коэффициент экранировки, учитывающий возможное затенение объекта соседними сооружениями застройки; K_3 - коэффициент перфорации, отражающий влияние проемности (отношение площади остекления к полной поверхности стеновых

ограждений α).

Таблица 31

Оценка поражающего действия ударной волны на объекты по давлению

Объект	Давление ΔP_{ϕ} , кПа, соответствующее степени разрушения			
	полное	сильное	среднее	слабое
1	2	3	4	5
Жилые и промышленные здания				
1. Кирпичные многоэтажные	30-40	20-30	10-20	8-10
2. Кирпичные мало-этажные	35-45	25-35	15-25	8-15
3. Деревянные	20-30	12-20	8-12	6-8
4. Промышленные здания:				
- с тяжелым метал-лическим и железобетонным каркасом	60-100	50-60	40-50	20-40
- с легким метал-лическим каркасом и бескаркасные	60-80	40-50	30-40	20-30
1	2	3	4	5
Сооружения и сети городского и коммунального хозяйства, энергетики, связи				
1. Тепловые электростации	10-15	15-20	20-25	25-40
2. Котельные, регуляторные станции в кирпичных зданиях	10-15	15-25	25-35	35-45
3. Подземные сети коммунального хозяйства (водопровод, канализация, газ)	1500	1000-1500	600-1000	400-600
4. Трубопроводы наземные	20	50	130	-
5. Трубопроводы на эстакадах	20-30	30-40	40-50	-
6. Смотровые колодцы и задвижки сетей коммунального хозяйства	1500	1000	300	200

продолжение таблицы 31

1	2	3	4	5
7. Трансформаторные подстанции	100	40-60	20-40	10-20
8. Водонапорные башни	70	40-60	20-40	10-20
9. Антенные устройства	10-20	20-30	30-40	40
10. Высоковольтные ЛЭП	120-200	80-120	50-70	20-40
11. Кабельные подземные линии	1500	1000-1500	800-1000	До 800
1	2	3	4	5
Сооружения транспорта				
1. Шоссейные дороги с асфальтовым и бетонным покрытием	4000	3000	1500	300
2. Металлические и железобетонные мосты пролетом до 50м	250-300	200-250	150-200	100-150
3. Взлетно-посадочные полосы аэродромов	4000	3000	1500	400
4. Железнодорожные пути	400	250	175	125
5. Силовые линии электрифицированных железных дорог	120	100	60	40
1	2	3	4	5
Транспорт, подвижная технология, хранилища				
1. Тепловозы с массой до 50т	90	70	50	40
2. Вагоны товарные деревянные	40	35	30	15
3. Цистерны для перевозки по железным путям сжиженных газов, нефтепродуктов	80	70	50	30
4. Цельнометаллические вагоны крытые	150	90	60	35
5. Землеройно-дорожно-строительные машины	300	200	125	80
6. Пожарные машины	70	5	35	10

продолжение таблицы 31

1	2	3	4	5
7.Резервуары и емкости стальные наземные	90	80	35	35
8. Газгольдеры и хранилища ГСП и химических веществ	40	35	25	20
9. Частично заглубленные резервуары для хранения нефтепродуктов	100	75	40	20
10.Подземные резервуары	200	180	75	40

Неблагоприятной считается ориентация наибольшей стены по нормали к направлению распространения ударной волны (рекомендуется $K_1 \cong 1,1$), благоприятной - при расположении стен под углом примерно 45° , ($K_1 \cong 0,8$); для промежуточных положений объекта (нейтральных) принимают $K_1 = 1$,

Для промышленных и гражданских зданий с проемами значение K_3 принимают равным:

α	0-0,3	0,3-0,5	0,5-0,7	0,7
K_3	1,1	1	0,9	0,85

Для других объектов берется $K_3=1$.

При расположении объекта на открытой территории (а также, когда расстояние до ближайшего строения превышает 50-70м) коэффициент $K_2=1$. При наличии экранирующих построек, расположенных на линии распространения ударной волны на расстояниях менее 50м, принимают значение коэффициента $K_2 = 0,7-0,9$ в зависимости от степени затенения.

ГЛАВА 8. ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙ НА ВЗРЫВООПАСНЫХ ОБЪЕКТАХ

8.1 Методика оценки опасностей и аварийности технологических процессов

Безопасность труда в промышленности достигается путем осуществления комплекса мероприятий на основе технического перевооружения отрасли, широкого внедрения средств комплексной механи-зации и автоматизации производственных процессов, снижения трудоемкости работ, повышения уровня обученности работающих при ведении техноло-гических процессов, что отвечает требованиям Между-народной организации труда и национальной политике РК в области безопасности и охраны труда. Поскольку главным объектом охраны труда является безопасность работника, то необходимо рассмотреть исполни-тельную деятельность оператора по планируемым и фактическим показателям техногенного риска технологического процесса и операций.

Данный критерий определяет меру опасности и характеризует возможность возникновения аварии и тяжесть ее последствий. Следовательно, количест-венные и качественные параметры безопасности труда целесообразно выразить математическим ожиданием ущерба при функционировании производственного объекта [124].

Теория и практика оценки антропогенных производственных факторов позволяют конста-тировать, что вероятностные методы обосновывают оптимизацию предлагаемых мер безопасности и

применимы в инженерных расчетах [127 - 130]. К основным критериям оценки относят коэффициент частоты, коэффициент тяжести и коэффициент потерь [125].

Существующие наработки по обеспечению безопасности работ в техносфере позволяют выделить три области, которые определяют условия труда на производстве: степень совершенства технологических решений принятых инженерных разработок, исполнительная деятельность работника, техническое состояние машин и агрегатов. С позиции теории множеств, совместная область, характеризующая фактическую производственную безопасность объекта, определяется коэффициентом производственной безопасности - надежности системы, рассчитываемым по следующей зависимости [129]:

$$K_{\text{б}} = K_{\text{п.р}} \cdot K_{\text{и.д}} \cdot K_{\text{б.м}} , \quad (106)$$

$K_{\text{б}}$ – коэффициент производственной безопасности; $K_{\text{п.р}}$ - коэффициент соответствия проектных решений принятых инженерных разработок; $K_{\text{и.д}}$ – коэффициент исполнительской деятельности работников; $K_{\text{б.м}}$ – коэффициент технической безопасности машин и установок технологического цикла.

Противоположная величина надежности работы системы является риском, который характеризует меру опасности:

$$R=1-R_{\text{T}} \quad (107)$$

Поскольку риск - это образ действия в условиях

неопределенности [126], то меру опасности следует рассчитывать с помощью показателей [127]:

- прогнозируемого ущерба;
- степени вывода из проектного состояния промышленного объекта;
- ожидаемого объема потерь хозяйствующими объектами выпускаемого товара.

При рассмотрении данных критериев как количественной оценки опасности в качестве признака идентификации необходимо рассматривать временной интервал простоя объекта или возможные материальные потери.

Риск следует понимать как величину вероятности опасного события или как удельную частоту опасного события по отношению к единичному объекту исследуемой техногенной сферы или к объектам опасности (к человеку или к фиксированной группе людей). Для отдельного человека важным является оценка риска за период трудового стажа (масштаб времени) в данном производстве. Меру безопасности можно оценить устойчивостью объектов и субъектов к опасным событиям – надежностью оценки исполнения обязанностей, оговоренных трудовым договором.

Возникновение чрезвычайных ситуаций обусловлено наличием остаточного риска. В соответствии с концепцией остаточного риска абсолютную безопасность обеспечить невозможно. Поэтому принимается такая безопасность, которая может обеспечить безопасность производства на данном этапе развития функционирования предприятия. Вероятность (P) наступления определенного сочетания нежелательных событий определяется выражением:

$$R = \sum_{i=1}^n P_i \quad (108)$$

При этом величина приемлемого риска характеризует:

- а) надежность оборудования, процесса и обслуживающего персонала;
- б) возможность возникновения нештатных аварийных ситуаций;
- в) наличие и совершенство мониторинга;
- д) предупреждение и ликвидацию последствий чрезвычайных ситуаций.

Анализ накопленной информации по статистике аварий свидетельствует, что динамика их числа и повторяемость подчиняются закону косинусоиды и представлена в виде трех компонент [128, 129]:

$$f(t) = \sum_{i=1}^n J_i f_i(t) + \sum_{j=1}^n J_j f_j(t) + \sum_{\theta} J_{\theta} f_{\theta}(t), \quad (109)$$

где i, j, θ - индексы относятся к рассматриваемым критериям допустимого (приемлемого) риска на стадии приработки, проектной эксплуатации, износа.

Основной характеристикой признака безаварийного функционирования системы является вариация, которая характеризуется отношением средне-квадратичного отклонения к математическому ожиданию, т.е:

$$\text{var}(t) = \frac{\sqrt{D}}{x}, \quad (110)$$

где D – дисперсия признака, x - математическое ожидание (среднее значение наблюдаемого признака).

Системный подход к концепции формирования происшествия в сфере безопасности с учетом количества объектов или субъектов по спектрам их категорий представляется следующим образом [130]:

а) работы системы:

$$P(t) = 1 - e^{-\lambda}, \quad (111)$$

где $e^{-\lambda}$ – риск (надежность) работы;

λ – интенсивность;

t – время регистрации отдельного события;

б) стационарности процесса (принцип неопределенности Гренандера):

$$\lambda t = \text{const} \quad (112)$$

в) разделения процесса на уровни (процессы) функ-ционирования:

$$k = 1-3,321 gn \quad (113)$$

г) вероятности проявления определенного призна-ка:

$$P_A(t) = \frac{M(x)}{D(x)}, \quad (114)$$

где $P_A(t)$ - вероятность анализируемого события;
 $M(x)$ – математическое ожидание.

Выделение аномального значения определяется как:

$$\tau = |x_i| - M(x) / \sqrt{D_x},$$

$$\tau \leq \tau_{h-p}$$

где x_i - предельный элемент выборки;

τ_{h-p} – табличное значение, вычисленное при доверительной вероятности (p – процентная точка нормированного выборочного отклонения).

Табличное значение доверительной вероятности принимается из условий числа степеней свободы анализируемого массива исходных данных и того, что значения прогнозируемых квантилей находятся в пределах 0,001.

Применительно к условиям, когда аварийная ситуация разбита на 8 категорий, что отвечает правилу Штюргеса, критериальное число составляет 6,859, что соответствует условиям современной концепции безопасности [131].

Анализ расчетных зависимостей и конкретные расчеты параметров опасных событий для различных исходных данных приводят к некоторым общим выводам о связи между величинами частот опасных ситуаций и опасных событий. Между этими явлениями имеется нелинейная связь, которая существенно зависит от вида опасностей и прогнозируемого ЧП.

Доминантой всего подхода к вероятностной составляющей является регулирование зависимости и вероятности ущерба, которое требует конкретных прогнозных значений.

Как показали проведенные исследования, коррекцию можно провести, используя формулу Байеса, которая позволяет произвести переход от аварийной ситуации к оценке общей вероятности события [127] и характеризует связь между ситуациями как экспоненциальную и гиперболическую, что подтверждено конкретными данными для ряда отраслей экономики.

При этом коррекцию перехода к иному масштабу анализа качественной характеристики аварийности следует производить как декремент функции затрат, а количественная характеристика анализируемого

класса уточняется показателем математического ожидания на начальный период функционирования и старения. Коррекция обязательна при риске профессиональной патологии более 0,01, изменении стажа операторов по отношению к оптимальному с учетом поправок на фактическое состояние тяжести и напряженности труда (ССБТ, ГОСТ 12.1.005).

Приведенные закономерности позволяют спрогнозировать масштабность техногенной чрезвычайной ситуации на основе периодичности событий их возникновения и возможного экономического ущерба.

За основу взяты сведения о масштабности чрезвычайных ситуаций (ЧС), представленные в Интернете (www.CATALOG.Ajaon.kz), что показано в таблице 32 пунктами 1...4, а вероятность риска рассчитана на основе принципа неопределенности Гренандера и предложенной нами закономерности.

Таблица 32

Сведения о масштабности ЧС техногенного характера

Масштаб чрезвычайной ситуации	Периодичность возникновения	Продолжительные последствия		Вероятность риска
		Экономический ущерб, долл. США	Количество пострадавшего населения, чел.	
1	2	3	4	5
Глобальный (планетарный)	Чрезвычайные ситуации техногенного характера, кроме полномасштабной мировой войны, данные неизвестны			$1,8 \cdot 10^{-10}$
Транснациональный (межгосударственный, континентальный)	30-40 лет	1-10 млрд.	10 тыс-2 млн.	$2 \cdot 10^{-10}$

продолжение таблицы 32

1	2	3	4	5
Национальный	10 -15 лет	100млн.- 1млрд.	1-100 тыс.	$7 \cdot 10^{-10}$
Межрегиональ-ный	5-18 лет	До 100 млн.	До 50 тыс.	$7 \cdot 10^{-10}$
Региональный	1-5 лет	10-100 млн.	1-10 тыс.	$3,6 \cdot 10^{-9}$
Местный	1-6 месяцев	1-10 млн.	10-1000	$1 \cdot 10^{-8}$
Объектный	1-30 дней	100 тыс.-1 млн.	1-100	$2 \cdot 10^{-6}$
Локальный	ежедневн о	До 100 тыс.	До 10	$6 \cdot 10^{-3}$

Корректировка вероятностей риска произведена по масштабности чрезвычайных ситуаций техногенного характера, оценкой на основе кривой Фармера, что позволяет принять ее в качестве математического ожидания рассматриваемого класса для любых отраслей хозяйствования и соответственно оценить уровень масштабности ЧС на предприятии на основе сведений по показателям травматизма, тяжести и потерь с учетом экономических затрат на мероприятия по охране труда.

Особенностью аварийности технологических процессов и процессов травматизма является то, что характеристики описываются как функции времени, при этом определенная группа вероятностных характеристик инвариантна во времени, то есть явля-ется характеристикой данного периода.

Это позволяет рассматривать анализируемые явления как стационарные, с использованием их эргодических особенностей, заключающихся в том, что вероятностные характеристики могут быть получены с вероятностью, близкой к единице, в

результате операции усреднения по одной реализации при достаточно большой длительности отрезка времени.

Среднее значение случайного процесса по ансамблю реализаций характеризуется его математическим ожиданием, которое для стационарных процессов не зависит от времени и представляет постоянное число. Дисперсия для стационарного эргодического случайного процесса является также постоянным числом. Необходимо отметить и тот факт, что для стационарных и эргодических случайных процессов корреляционная функция может быть определена по одной реализации процесса [128].

Рассматриваемые явления аварийно-технологического процесса представляют редкие события. Функциональная зависимость, описывающая анализируемое событие, представляет экспоненту и отвечает условиям распределения Пуассона.

Принцип неопределенности Гренандера постоянными значениями анализируемого частотного ряда можно представить следующим образом:

$$\Delta f \cdot T = \text{const} , \quad (115)$$

принимая во внимание, что ожидаемая среднеквадратичная ошибка измерения спектральной плотности полосы спектра определяется величиной:

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{2T\Delta f_{\text{эп}}}} , \quad (116)$$

где T – средняя наработка на отказ;

Δf – частотность;

$\Delta f_{\text{эп}}$ – эквивалентна полосе избирательного фильтра.

Принцип неопределенности Гренандера характеризуется постоянной, равной дисперсии измерений или наблюдений, которая определяет условия принятия эксперимента к рассмотрению или оценки аварийного состояния:

$$A = \frac{1}{2\varepsilon^2}, \quad (117)$$

то есть применительно полосы исследования спектра погрешность оценки аварийности является ее константой, определяемой условиями ведения технологического процесса.

Для начального участка (условия формирования опасности) оценку зависимости периода приработки можно оценить математическим ожиданием, представляющим собой среднеарифметическое значение рассматриваемого временного участка, соответствующее прогнозной продолжительности наработки на отказ периода:

$$m^* = \frac{1}{2}[x(0) + x(T)], \quad (118)$$

где m – математическое ожидание данной величины.

Временной параметр формирования чрезвычайной ситуации определяется отношением [128]:

$$\frac{F(x)}{F'(x)} \approx T, \quad (119)$$

где $F(x)$ – функция и ее соответствующие производные, что соответствует:

$$\frac{F'(x)}{F''(x)} \approx T. \quad (120)$$

При условии правильности оценки временного периода анализируемого явления:

$$\frac{F(x)}{F'(x)} \approx \frac{F'(x)}{F''(x)}. \quad (121)$$

Применительно к рассматриваемым вероятностным значениям анализируемых процессов вероятность определяется как отношение квадрата плотности распределения значений массива к его дисперсности (квадрату среднеквадратичного отклонения).

Мерой точности для зависимости (121) является условие определения оценки второй производственной функции, поскольку согласно неравенству Каши имеем: [128]

$$\|f\| = \sqrt{\int_a^b f^2(x) dx}, \quad (122)$$

где $\|f\|$ - норма функции, которая оценивается согласно теории статистики фиксированным значением среднеквадратичного отклонения.

Как и любой стохастический процесс, техногенная ситуация подлежит оценке ее воздействия на рабочее пространство, оператора и требует определенной коррекции при ее рассмотрении, что позволяет воспользоваться методом декомпозиции (разбиения) анализируемого процесса на зоны: упреждения, ожидания и глобального усреднения, которые

определяют ее как тяжесть труда, травматизма, аварийность. Данные факторы зафиксированы как в отечественных, так и в зарубежных исследованиях и увязываются со снижением производительности труда, аварийностью и травматизмом. Так, федеральное законодательство США требует учета возможности травматизма по косвенным факторам, в том числе по снижению производительности труда, а в странах СНГ большинство аварий следующих трех категорий обусловлены нарушениями технологического процесса, связанными с количеством и качеством выпускаемой продукции:

I. - чрезвычайная ситуация, сопровождающаяся применением защитных устройств, индивидуальных защитных средств, но при этом не снижающих производительность труда. Ее можно отнести к зоне упреждения стохастического процесса и решение сводится к управлению техпроцессом;

II. - зона аварийности (зона чрезвычайного происшествия) соответствует ожиданию стохастической ситуации, что отвечает условиям травматизма и аварийности, сопровождающейся катастрофическими последствиями;

III. - зона катастроф соответствует максимальным нарушениям условий труда, связана с максимальными нарушениями технологического процесса и сопровождается людскими, материальными и финансовыми потерями. Данная зона соответствует условиям зоны глобального усреднения.

Аварийность целесообразно описывать распределением Юла-Фарри, имеющим следующий вид при $n = 1, 2, 3$:

$$Pn(T) = \{e^{-\lambda\tau(1-e)^{-\lambda\tau}n-1}\}. \quad (123)$$

Поскольку степень нарушения технологического процесса выражается по абсолютной величине, долей ее отклонения от прогнозного значения, то вероятность этого события, согласно правилу Чебышева, оценивается соотношением:

$$P|(x-m) < \varepsilon| \geq 1 - \frac{D}{\varepsilon^2}. \quad (124)$$

Следовательно, ошибки интерполяции участка определяются соотношением:

$$\varepsilon^2 = (\text{var})^2 = \frac{\|f\|^2 - m^2}{(m')^2} \quad (125)$$

и выражают предельную вариацию признаков исследуемого явления (события) или оценочный уровень сертификации (надежности события) [126, 127].

Полученные закономерности являются зависимостями расчета параметров риска проведения технологических процессов по их аварийности и характеризуют надежность функционирования технической системы.

Проверку приведенной методики мы провели на основе данных травматизма шахт Карагандинского бассейна: 30 несчастных случаев из 330 сопровождались серьезными повреждениями и один представлял тяжелый случай, и это свидетельствует, что шахты Караганды с учетом срока их эксплуатации, работают в режиме деградации.

Наличие или комбинация трех факторов в течение

этого периода могут привести к катастрофическим последствиям, о чем свидетельствуют сведения о степени тяжести воздействия, определенные на основании пирамиды Дюпоне [125].

Все это позволяет констатировать, что предлагаемая методика пригодна для инженерных расчетов и прогноза.

8.2 Методика оценка последствий аварий

Современная политика нашего государства в области промышленной безопасности выдвигает на первый план проблему анализа, количественной оценки и управления рисками аварий на взрывоопасных производствах.

Существование в настоящее время большого количества разнообразных методик оценки последствий аварий, существенно различающихся по точности, сложности и глубине анализа поражающих факторов и определяет необходимость их всестороннего изучения и анализа [132]. Так, для оценки последствий аварий на производствах, связанных с хранением, переработкой и транспортировкой горючих жидкостей принят следующий порядок [133].

При разрушении резервуара объем вытекающей жидкости принимается равным 80 % от общего объема резервуара.

При разрушении трубопровода объем вытекающей жидкости определяется по формуле:

$$V=0,79 \cdot D^2 \cdot L, \quad (126)$$

где V - объем вытекающей жидкости, м^3 ; D - диаметр трубопровода, м ; L - длина отрезка между соседними отсекаателями.

Размеры разлития зависят от объема вытекающей жидкости и условий растекания. При свободном растекании диаметр разлития может быть определен из выражения:

$$d=(25,5 \cdot V)^{1/2}, \quad (127)$$

где d - диаметр разлития, м ; V - объем вытекшей жидкости, м^3 .

При разлитии в поддон или обваловании условием для закрытия дна является слой жидкости толщиной более $0,02\text{м}$, т.е. $V/S > 0,02$, где S - площадь поддона (обвалования), м^2 .

Величина теплового потока q на заданном расстоянии от горящего разлития определяется по формуле:

$$q = 0,8 \cdot Q_0 \cdot e^{-0,03x}, \quad (128)$$

где q - тепловой поток на заданном расстоянии, $\text{кВт}/\text{м}^2$;

Q_0 - тепловой поток на поверхности факела, $\text{кВт}/\text{м}^2$;

X - расстояние от фронта пламени, м .

Расстояние, на котором будет наблюдаться тепловой поток с заданной величиной q , определяется по формуле:

$$X = 33 \ln(0,8 \cdot Q_0/q) \quad (129)$$

Величина индекса дозы теплового излучения горящего разлития определяется из соотношения:

$$J = 60q^{4/3} \quad (130)$$

Возможность воспламенения различных материалов определяется по таблице 33.

Таблица 33

Тепловой поток на поверхности факела от горящих разлитий

Вещество	Тепловой поток,квт/м
1	2
Ацетон	80
Бензин	130
Дизельное топливо	130
Гексан	165
Метанол	35
Метилацетат	50
Венилацетат	60
Аммиак	30
Керосин	90
Нефть	80
Мазут	60

Данная методика использовалась нами при оценке последствий аварий на потенциально опасных производствах в Карагандинском регионе.

Анализ аварийных ситуаций показывает, что при аварийной разгерметизации оборудования и при наличии в начальный момент времени источника воспламенения возникает пожар разлития либо факельное горение.

Возникновение источника воспламенения, когда газопаровоздушная смесь в результате эволюции достигла опасных концентрационных пределов воспламенения, в диапазоне от верхнего предела концентрации до нижнего его значения, приводит к

взрыву. При отсутствии источника воспламенения в начальный момент времени формируется газопаровое облако, которое рассеивается по направлению ветра, представляя токсическую опасность для прилегающих территорий [134, 135].

8.3 Оценка экономического ущерба от аварии

Оценка ущерба является необходимым составляющим элементом регулирования промышленной безопасности, в том числе декларирования промышленной безопасности и страхования опасных производственных объектов.

Статистические данные свидетельствуют о том, что ущерб от аварий в производственных зданиях во всем мире остается довольно большим и имеет тенденцию ежегодного увеличения. Этому способствуют интенсификация и концентрация производств, повышение их энерговооруженности, введение новых веществ, взрывоопасные свойства которых подчас недостаточно изучены.

Как отмечалось выше, в настоящее время ежегодные убытки, по данным американского страхового общества, на предприятиях страны составляют от 75 до 130 млн. долларов.

Аварии, сопровождающиеся взрывами, чаще всего происходят в химической, нефтехимической, газовой и некоторых других отраслях промышленности, которые связаны с горючими газами, легковоспламеняющимися парами горючих жидкостей, пылей.

Для производственных зданий, где возможны взрывы горючих смесей, наряду с мерами по их предотвращению принимаются меры по защите

людей, оборудования и строительных конструкций в случае возникновения взрыва внутри помещения. Такое положение объясняется тем, что образование взрывоопасных концентраций происходит так быстро, что обслуживающий персонал, как правило, не в состоянии предотвратить взрыв.

Большая скорость распространения пламени и значительное количество тепла, выделяющееся при взрыве горючих смесей в объеме помещения, приводит к резкому повышению давления и к разрушению элементов оборудования и строительных конструкций, к человеческим жертвам, повреждению технологического оборудования и остановке производства.

Многолетний анализ аварий, происходящих на предприятиях химической и нефтехимической промышленности в СНГ и за рубежом, показывает, что большая часть их (около 90%) связана с образованием и взрывом парогазовых смесей. Из этого числа около 43% аварий приходится на производственные помещения и открытые установки [136].

Для решения перспективных вопросов техники безопасности следует изучать возможности образования взрывоопасных газовых смесей и на этой основе разрабатывать эффективные средства предупреждения аварий [137].

Структура ущерба от аварий на опасных производственных объектах, как правило, включает:

- полные финансовые потери организации, эксплуатирующей опасный производственный объект, на котором произошла авария; расходы на ликвидацию аварии;

- социально-экономические потери, связанные с травмированием и гибелью людей (как персонала организации, так и третьих лиц);

- вред, нанесенный окружающей природной среде; косвенный ущерб и потери государства от выбытия трудовых ресурсов [138].

Оценка экономического ущерба от аварии может проводиться по следующей методике.

Величина полного экономического ущерба определяется:

$$Y_n = Y_{пр} + Y_k, \quad (131)$$

где $Y_{пр}$ - прямой экономический ущерб от аварии на объекте экономики, тенге;

Y_k - косвенный ущерб, тенге.

1. Величина прямого экономического ущерба определяется как:

$$Y_{пр} = (C_3 + C_{то} + C_{кэс}) - C_{и} + C_{об}, \quad (132)$$

где C_3 - балансовая стоимость зданий и сооружений, тенге.; $C_{то}$ - балансовая стоимость технологического оборудования, тенге; $C_{кэс}$ - балансовая стоимость коммунально - энергетических систем, тенге; $C_{и}$ - величина износа;

$C_{об}$ - стоимость оборотных средств: где $C_{об} = \sum_{i=1}^a S_{ифс}$, где $S_{ифс}$ - фактическая стоимость оборотных средств на единицу ресурса, тенге.

2. Величина косвенного экономического ущерба определяется как:

$$Y_k = C_{nc} + C_{п} + C_{ш} + C_{оп} + C_{ла} + C_{д} + C_{эк}, \quad (133)$$

где C_{nc} - стоимость нового строительства;

$C_{п}$ - величина прибыли от непроизведенной продукции за время восстановления;

$C_{ш}$ - величина штрафов за невыполнение договорных обязательств по поставкам продукции;

$C_{оп}$ - расходы для оказания помощи пострадавшим и их семьям при аварии или стихийном бедствии;

$C_{ла}$ - стоимость ликвидации аварии (ЧС);

$C_{д}$ - стоимость дезактивации, дегазации, дезинфекции, дезинсекции и демеркуризации;

$C_{эк}$ - экономический ущерб.

Стоимость нового строительства:

$$C_{мс} = C_{м} + C_{з} + C_{а} + C_{пр}, \quad (134)$$

где $C_{м}$ - стоимость материальных ресурсов, необходимых для проведения работ;

$C_{з}$ - заработная плата работников с отчислениями;

$C_{а}$ - сумма амортизационных отчислений от применяемых технических средств при проведении работ;

$C_{пр}$ - прочие затраты на проведение работ.

Величина прибыли от непроизведенной продукции за время восстановления:

$$C_{п} = П_{пл} \cdot t / 12, \quad (135)$$

где $П_{пл}$ - годовая планируемая прибыль; t - период времени (месяцев) восстановительных работ в зависимости от степени разрушений зданий: t -

полная; t-сильная; t- средняя; t-слабая; t-легкая (расстекление).

Величина штрафов за невыполнение договорных обязательств по поставкам продукции определяется следующим образом:

$$C_{ш} \cdot \hbar \sum_{i=1}^k N_{инк} \cdot V_{инк} , \quad (136)$$

где $N_{ш}$ - норматив штрафов за определенный объем недопоставки конкретному потребителю годовой продукции, %, тенге.; $V_{н}$ - объем недопоставки продукции конкретному потребителю в натуральном выражении; k - количество потребителей годовой продукции.

Величина расходов на оказание помощи пострадавшим и их семьям:

$$C_{он} \cdot \hbar \sum_{i=1}^m P_{ин} \cdot D_{ин} , \quad (137)$$

где P - количество пострадавших человек по конкретному фактору поражения, чел.; D - сумма денежной компенсации (оказания материальной помощи) по конкретному фактору поражения; m - число факторов поражения. Стоимость ликвидации аварии:

$$C_{да} = Y_{пр} \cdot K_i \quad (138)$$

где $Y_{пр}$ - величина прямого ущерба, тенге; K - приведенный коэффициент, зависящий от степени разрушения зданий и сооружений:

для полных разрушений $K_1 = 3$;

для сильных разрушений $K_2 = 2$;

для средних разрушений $K_3 = 1,5$;

для слабых разрушений $K_4 = 0,5$;

для легких разрушений $K_5 = 0,1$.

В случае, если здания получили различную степень разрушения, приведенный коэффициент берется для самой тяжелой степени разрушения. При этом легкими считаются разрушения, радиус зоны которых равен радиусу зоны расстекления.

Стоимость дезактивации, дегазации, дезинфекции, дезинсекции и демеркуризации определяется как:

$$C_{Д} = \sum_{i=1}^s F_{is} \cdot W_{is}, \quad (139)$$

где F - площадь, подвергшаяся заражению по конкретному фактору поражения или масса, объем, количество материалов, подвергшихся заражению; W - норматив стоимости средств дезактивации, дегазации и т.д.; s - число факторов заражения.

Экологический ущерб, $C_{экол}$, рекомендуется определять как сумму ущербов от различных видов вредного воздействия на объекты окружающей природной среды:

$$C_{экол} = Э_a + Э_в + Э_п + Э_б + Э_о, \quad (140)$$

где $Э_a$ - ущерб от загрязнения атмосферы, тенге;

$Э_в$ - ущерб от загрязнения водных ресурсов, тенге;

$Э_п$ - ущерб от загрязнения почвы, тенге;

$Э_б$ - ущерб, связанный с уничтожением биологических (в т.ч. лесных массивов) ресурсов, тенге;

$Э_о$ - ущерб от засорения (повреждения) территории обломками (осколками) зданий, сооружений, оборудования и т.д., тенге.

Следует отметить, что при оценке ущерба от аварии на производственном объекте за время расследования аварии (10 дней), как правило, подсчитываются те составляющие ущерба, для которых известны исходные данные. Окончательно ущерб от аварии рассчитывается после окончания сроков расследования аварии и получения всех необходимых данных. Составляющие ущерба могут быть рассчитаны независимо друг от друга.

Таким образом, большое значение при оценке экономического ущерба от аварии имеет своевременность ее проведения и выбор методики оценки [139].

В целом, оценка ущерба от аварий на производственных объектах является основой для:

- учета и регистрации аварий по единым экономическим показателям;
- оценки риска аварий на производственных объектах;
- принятия обоснованных решений по обеспечению промышленной безопасности;
- анализа эффективности мероприятий, направленных на снижение размера ущерба от аварий.

ГЛАВА 9. ХАРАКТЕРИСТИКА ПОРАЖАЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОВОЙ РАДИАЦИИ ОТ ВЗРЫВА

9.1 Общие сведения

Поражающее действие теплового излучения является наиболее частым спутником случайных взрывов. И, наоборот, пожары обычно приводят к ава-рийным взрывам в результате перегрева сосудов высокого давления, опасных химических и взрывчатых веществ.

Если сосуд высокого давления подвергнуть действию огня, то нагрев может ослабить прочность стенок, а передача тепла веществу, содержащемуся в сосуде, вызовет повышение давления внутри сосуда. Сочетание высокой температуры корпуса сосуда и повышенного давления может привести к его разрыву. Кроме того, повышенная температура может привести к химическим реакциям и стать причиной детонации взрывчатого вещества.

Фактически, термин "пожар и взрыв" нередко употребляют в одном и том же смысле и он означает одно и то же явление. В данной главе рассматривается поражающее действие теплового излучения для тех классов взрывов, в результате которых образуются огненные шары больших размеров. Взрывы различных видов топлива, взрывы химических продуктов, сосудов с последующим взрывом облака паров в ограниченном открытом объеме, горение жидкостей в открытых резервуарах и т.д. - все эти явления могут привести к образованию огненных шаров.

При ядерных взрывах действие теплового излу-

чения может вызвать особенно тяжелые последствия, составляя значительную часть поражающего эффекта при использовании ядерного оружия. Начиная с 1946 года, большинство методов и экспериментальных данных по тепловому излучению при взрывах ограничивались термоядерными источниками вследствие того, что тепловому импульсу отводилась важная роль как одному из поражающих факторов ядерного оружия.

В результате химических взрывов могут возникать огненные шары огромных размеров. Нередко образование огненного шара сопровождается мощной воздушной волной. Крупные и долгоживущие огненные шары, как правило, оказываются одновременно достаточно горячими, чтобы вызвать поражение тепловым излучением посредством воспламенения горючего материала или ожогового действия на человека. Конечно, вероятность поражения окажется еще более высокой, если объект попадет внутрь огненного шара.

Подробный анализ 81 аварии, зарегистрированной при производстве ВВ и ракетных топлив и завершившейся тяжелыми ранениями и летальными исходами [121], показал, что лучистое тепло было существенным фактором поражения. Из 81 аварии 23 привели лишь к пожару, в 44 случаях произошли пожар и взрыв и 14 аварий привели к взрыву без пожара. В этой 81 аварии погибли 78 человек, и лишь один человек погиб от высокого давления, возникшего при взрыве. Остальные 11 летальных исходов были вызваны либо поражающим действием разлетающихся осколков, либо смертельными ожогами в результате

теплового облучения. Эти факты свидетельствуют, что наиболее серьезное внимание следует уделять поражающему действию осколков и лучистого тепла.

К сожалению, проблемы роста огненного шара и лучистой энергии, вызывающей тепловое поражение и разрушение, изучены пока недостаточно. Поэтому ниже будет изложен подход, который позволит установить метод оценки зависимости, существующей между размером и температурой огненного шара, расстоянием и порогами поражения тепловым излучением.

В дальнейшем изложении данного вопроса будут рассмотрены рост огненного шара, т.е. изменение во времени его диаметра и температуры, затем перенос тепловой энергии огненного шара излучением. И наконец, будут представлены критерии, которые позволяют определить степень поражения различных приемников тепла, т.е. людей, горючих материалов, ракетных топлив. Все эти три фактора (развитие источника, перенос лучистой энергии и критерии поражения) следует затем объединить, чтобы получить окончательное решение задачи.

9.2 Закономерности нестационарного развития огненного шара при взрыве

Нестационарное развитие огненного шара, образующегося при взрыве или пожаре, можно исследовать, пользуясь теорией подобия или размерностей. Если известны все параметры, определяющие задачу, то теория размерностей позволяет представить совокупность этих параметров в виде некоторого числа безразмерных комбинаций. К решению задачи о нестационарном

развитии огненного шара можно приступить, имея шесть параметров.

Чтобы определить закономерности нестационарного развития огненного шара, выделим основные физические параметры, которые включают количество выделившейся энергии E (предполагается, что энергия выделяется мгновенно), диаметр огненного шара D , являющийся функцией времени t , температуру огненного шара T (зависящую от природы горючего вещества), теплоемкость воздуха в огненном шаре $\rho \cdot C_p$ и постоянную Стефана-Больцмана σ , которая учитывает энергию, рассеиваемую в окружающее пространство излучением. При этом не учитывается кондукция и конвекция, которые считаются вторичными по сравнению с летучим переносом, и рассматривается изменение во время количества тепла, запасенного в объеме огненного шара.

Теория размерностей [121] позволяет перейти от шестимерного к двумерному пространству по двум безразмерным величинам. Метод перехода представляет чисто алгебраическую процедуру, которая не вводит в решение каких-либо дополнительных ограничений. Две безразмерные величины представляют собой комбинации степенных функций от параметров σ , ρ , C_p , E и T . Эти величины связаны следующей функциональной зависимостью [121]:

$$\frac{(\rho \cdot C_p)^{1/3} \cdot T^{1/3} \cdot D}{E^{1/3}} = \left[\frac{\sigma \cdot T^{10/3}}{(\rho \cdot C_p)^{2/3} \cdot E^{1/3}} \right]. \quad (141)$$

Так как в уравнение (141) входят только два безразмерных параметра, то это означает, что

результаты конкретного эксперимента и данные, полученные при анализе аварий, можно представить в безразмерном виде и определить единую функциональную зависимость.

Если предположить, что $\rho \cdot C_p$ и σ сохраняются постоянными при авариях различного характера, то тогда можно получить упрощенный вариант уравнения (141):

$$\frac{T^{1/3} \cdot D}{E^{1/3}} = \psi \cdot \left[\frac{T^{10/3} \cdot t}{E^{1/3}} \right]. \quad (142)$$

Температура T , которая входит в уравнение (142), определяется в основном типом вещества. Ракетные топлива дают температуру около 2500°K , а горючие газы дают температуру около 1350°K . Для большинства опасных веществ огненный шар очень быстро достигает максимального размера, который затем мало изменяется в течение длительного времени вплоть до его гибели в момент времени t^* . Следовательно, если не учитывать нестационарную стадию формирования огненного шара, то из уравнения (142) получаем:

$$A_1 = T^{1/3} \cdot D/E^{1/3}, \quad (143)$$

$$A_2 = T^{10/3} \cdot t^*/E^{1/3} \quad (144)$$

где A_1 и A_2 - постоянные коэффициенты.

Уравнение (144) можно переписать в форме, позволяющей провести сопоставление с результатами, которые были получены другими исследователями. Для конкретного вещества полное энергосодержание прямо пропорционально полной массе вещества, поэтому уравнение (145) можно

записать в следующем виде:

$$b = T^{10/3} \cdot t^*/M^{1/3}, \quad (145)$$

где M - полная масса взрывающегося вещества; b - константа.

Уравнение (146) означает, что при разных массах ВВ, так и ракетные топлива, различающиеся в два раза по абсолютной температуре, создадут огненные шары, которые будут различаться по диаметру лишь на 20%. С другой стороны, из уравнения (147) следует, что вследствие большого показателя степени при температуре (равного 10/3) ожоговое действие более холодного огненного шара, образовавшегося при взрыве ракетного топлива, будет в 10 раз более продолжительным, чем в случае ВВ равной массы. Физически это объясняется тем, что более горячий объект быстрее излучает свою энергию по сравнению с более холодным.

Наиболее общее соотношение между диаметром огненного шара D (м) и массой химических веществ M (кг), а также временем жизни огненного шара имеет вид согласно работе [121]:

$$D = 3,86 \cdot M^{0,32}, \quad (146)$$

$$t^* = 0,299 \cdot M^{0,32}. \quad (147)$$

Показатели степени 0,32 в обоих уравнениях очень близки к значению 1/3, которое предсказывает теория. Если показатели степени заменить на 1/3, то числовые коэффициенты, входящие в формулы (146) и (147), слегка изменятся.

В работе [121] получено хорошее согласие с данными по диаметрам огненных шаров, однако обнаружено расхождение по времени жизни. Поэтому первоначально было принято, что огненный

шар имеет полусферическую форму. Затем по мере того, как начинает проявляться действие подъемных сил на горючие газы, огненный шар всплывает и принимает сферическую форму. Далее предполагается, что, когда все горючее вещество прореагирует, радиальный рост или расширение огненного шара прекращается, а подъемная сила заставляет огненный шар оторваться от земли. Почти сразу после начала подъема все горючее расходуется и огненный шар выгорает. Другими словами, предполагается, что время сгорания топлива, время подъема и время достижения максимального размера огненного шара совпадают.

В работе [121] также проведена обработка экспериментальных данных для огненных шаров небольших диаметров, образующихся при взрывах пропана, пентана и октана в воздухе. Полученные данные представлены на рисунке 48.

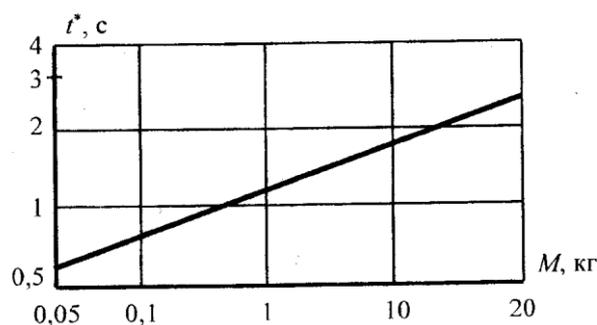


Рисунок 48. Логарифмическая зависимость времени достижения максимального размера огненного шара t^* от массы горючего вещества M в кг

Время жизни огненного шара с трудом поддается точной оценке из-за отсутствия резких проявлений окончания процесса охлаждения огненного шара. Формула (147) была получена для больших разливов

горючего с массой свыше 20кг. По рисунку 48 необходимо определять время жизни огненного шара при малых разливах с массой менее 20кг.

Необходимо также отметить расхождение в оценках времени жизни огненных шаров у различных экспериментаторов. В анализе, который выполнен на основе метода подобия, использовалось допущение, что перенос энергии связан с излучением и можно пренебречь вкладом теплопроводности и конвекции. Для огненных шаров небольших диаметров это допущение может не выполняться.

При рассмотрении огненных шаров предполагалось также, что их излучательная способность соответствует абсолютно черному телу. В большинстве случаев независимо от размера и происхождения (будь то сгорание ВВ или углеводорода) огненный шар является оптически толстым и его излучательная способность, по видимому, составляет примерно 0,7 - 1,0. Отсутствие надежных методов оценки излучательной способности для конкретных источников, а также хорошие результаты, достигнутые при моделировании с излучательной способностью, которая считалась равной единице, все это служит достаточным оправданием выбранного метода.

9.3 Особенности теплового излучения огненного шара при взрыве

При аварийном вскрытии газопроводов и емкостей, разливах углеводородов и их испарении облако ГПВС, переобогащенное топливом, не детонирует, а интенсивно горит, образуя огненный шар. Большая вероятность такого процесса

обусловлена также тем, что для большинства углеводородов концентрационные пределы воспламенения их ГПВС шире, чем детонации.

Поражающее действие огненного шара определяется интенсивностью его теплового излучения. Возникновение огненных шаров возможно при разрушениях резервуаров и сосудов с горючими жидкими перегретыми продуктами (сжиженные углеводородные газы, аммиак, хлор, фреоны, содержащиеся в замкнутых объемах при повышенном давлении).

При разрушении системы с перегретой жидкостью происходит ее разлив и быстрое испарение. Взрывной характер процесса объясняется кратковременностью аварийного вскрытия сосудов, резервуаров и другого оборудования, содержащих продукт под давлением. Например, время τ_k полного разрушения сосуда объемом $V=100 \text{ м}^3$ при давлении 1 МПа составляет примерно 7 мс.

Время τ_0 , с, образования парового облака можно определить по формуле:

$$\tau_0 \approx 0,78 \sqrt[3]{V \cdot (K \cdot n - 1) / a}$$

где V - объем жидкого продукта, м^3 ; $n = \rho_{\text{сж}} / \rho$ - отношение плотностей жидкости и парового облака при его расширении до объема с предельным радиусом R_0 , соответствующего атмосферному давлению; a - скорость звука, м/с, с которой смещается внешняя граница облака до значения $R_0 = a \cdot \tau_0$, м; K - доля быстро испаряющейся жидкости в адиабатическом режиме при температуре T (рисунок 49).

Например, для $V = 100 \text{ м}^3$ сжиженного под давлением пропана $n = 582 / 1,3 = 448$; при $T = 20^\circ \text{C}$

$K = 0,38; \alpha \approx 300 \text{ м/с:}$

$$\tau_0 = \sqrt[3]{100(0,38 \cdot 448 - 1)} / 300 = 0,067 \text{ с.}$$

Время τ_0 почти на порядок больше времени разрушения сосуда τ_k .

Обычно огненный шар весьма быстро достигает максимума своего радиуса R_0 , который сохраняется в течение всего времени существования шара.

В работе [121] приведены следующие подтвержденные опытами формулы для радиуса R_0 , м, и времени существования t^* , с, огненного шара:

$$R_0 = 0,5 \cdot A_3 \cdot M^a, t^* = A_4 \cdot M^\beta$$

где M – масса испарившегося продукта, кг; A_3, A_4, α, β – коэффициенты.

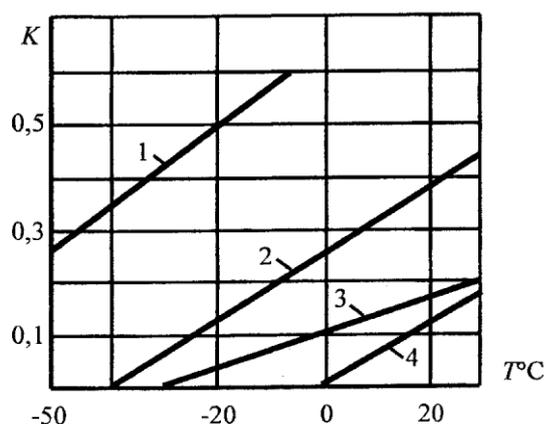


Рисунок 49. Зависимость $K(E)$ для сжиженных этилена (1), пропана (2), хлора и аммиака (3), бутана (4)

Для различных энергоносителей (боеприпасы, жидкие ракетные топлива, сжиженный нефтяной газ - СНГ) значения коэффициентов достаточно близки:

$$A_3 = 3,76 - 3,86;$$

$$A_4 = 0,258 - 0,299;$$

$$\alpha = 0,325 - 0,320; \quad \beta = 0,349 - 0,320.$$

Для нефтяного газа эти данные соответствуют огненному шару диаметром 180м, образовавшемуся при разливе 68т сжиженного газа при аварии автоцистерны.

Зависимость изменения приведенного радиуса \bar{R} от приведенного времени \bar{t} удовлетворительно аппроксимируется выражением:

$$\bar{R} = 44,3 \cdot \bar{t} / (1,11 + t), \quad (148)$$

$$R = R \cdot \bar{R} = R \cdot \sqrt[3]{\theta/M}, \bar{t} = 10^{-10} \cdot t \cdot \sqrt[3]{\theta^{10} M} .$$

где t - время в с; θ - температура в К; M - масса в кг.

Температура θ огненного шара зависит от типа вещества. Так, при горении ракетных топлив $\theta = 2500^\circ\text{К}$, горючих газов $\theta = 1350^\circ\text{К}$.

Для небольших огненных шаров, образуемых при взрывах пропана, пентана и октана в воздухе ($M \leq 10\text{кг}$), были получены значения констант $A_4 = 1,07$, $\beta = 0,181$ в формуле для определения t^* .

Поражающее действие теплового излучения определяется тепловой энергией, приходящейся на единицу поверхности на конкретном расстоянии r от центра огненного шара. Зависимость величины теплового потока и q , Вт/м^2 от расстояния r , м, определяется соотношением:

$$\frac{q}{\theta^4} = \frac{G(2R_0/r)^2}{F + (2R_0/r)^2} \quad (149)$$

где $F = 161,7$; $G = 5,26 \cdot 10^5$ - константы.

Величина тепловой энергии (доза или импульс теплового излучения), падающей на единицу

поверхности Q , Дж/м², определяется интегрированием функции для q . Принимая R_0 и θ за константы, получаем ($b \cdot G = 2,04 \cdot 10^4$):

$$\frac{Q}{b \cdot G \sqrt{M \cdot \theta^2}} = \frac{(2R_0/r)^2}{F + (2R_0/r)^2} \quad (150)$$

Согласно работе [121] данные по огненному шару от сгорания ГПВС при выбросах сжиженного нефтяного газа из емкостей следующие:

$$R_0 = 29 \cdot M^{1/3}, \quad (151)$$

время его существования t^* , с,

$$t^* = 4,5 \cdot M^{1/3}, \quad (152)$$

где M - величина вместимости емкости по массе, т.

При наличии трех резервуаров за величину M принимается 90% вместимости.

Поток излучения q , кВт/м², падающий на мишень, определяется по формуле:

$$q = E \cdot F \cdot T_p, \quad (153)$$

где E - мощность поверхностной эмиссии огненного шара, кВт/м ;

F - коэффициент, учитывающий фактор угла падения; T - проводимость воздуха. Для баллонов, вертикальных и горизонтальных резервуаров $E = 270$ кВт/м², для сосудов шарообразной формы $E = 200$ кВт/м².

Коэффициент F и проводимость T_p определяются по формулам:

$$F = R_0^2 \cdot r / \left[(R_0^2 + r^2)^{3/2} \right] T_p = 1 - 0,058 \cdot \ln r \quad (154)$$

где $r > 2 \cdot R_0$ - расстояние по горизонтали от хранилища СНГ до мишени. Импульс теплового

излучения Q , кДж/м², определяется по формуле:

$$Q = g \cdot t^* . \quad (155)$$

Например, при аварийном вскрытии вертикального резервуара емкостью 100 т и $r = 300$ м имеем:

$$R_0 = 29 \cdot (100/2)^{1/3} = 4,5 \cdot 50^{1/3} = 16,6 \text{ с};$$

$$F = 107^2 \cdot 300 / [(107^2 + 300^2)^{3/2}] = 0,106;$$

$$T_p = 1 - 0,0583 \cdot \ln 300 = 0,67.$$

Поток излучения $q = 270 \cdot 0,106 \cdot 0,67 = 19,2$ кВт/м², доза импульса теплового излучения $Q = 19,2 \cdot 16,6 = 317$ кДж/м².

При вскрытии резервуара емкостью 1000 т и $r = 600$ м получим:

$$R_0 = 23 \text{ м}; t^* = 35,7 \text{ с}; F = 0,12; T_p = 0,629; q = 20,4 \text{ кВт/м}^2; Q = 317 \text{ кДж/м}^2.$$

На рисунке 50 приведена зависимость от расстояния величины светового импульса в результате сгорания пропано-воздушной смеси от разлива 1000 т жидкого пропана.

Воспламенение различных материалов зависит от теплового импульса и его длительности. Минимальная величина импульса, вызывающего воспламенение древесных материалов, составляет примерно 0,4 МДж/м². Как видно из таблицы 34, величина воспламеняющего импульса растет с его длительностью, т.е. с мощностью взрыва. В таблице 35, приведены данные о действии теплового излучения на остекление.

Болевой температурный порог для кожи человека соответствует температуре $T_n = 44^\circ\text{C}$. При $T > T_n$ степень поражения зависит от удельной энергии и длительности облучения τ . Считается, что без болевых ощущений кожа выдерживает тепловой

поток интенсивностью $q = 21 \text{ кВт/м}^2$ в течение 2 с. При стационарном потоке этим данным соответствует $Q = 42 \text{ кДж/м}^2$. Предельно безопасный радиус R_E соответствует $Q = 42 \text{ кДж/м}^2$. Предельно безопасный радиус R_E согласно работе [124] для человека составляет примерно $(3,1-3,6) \cdot R_0$.

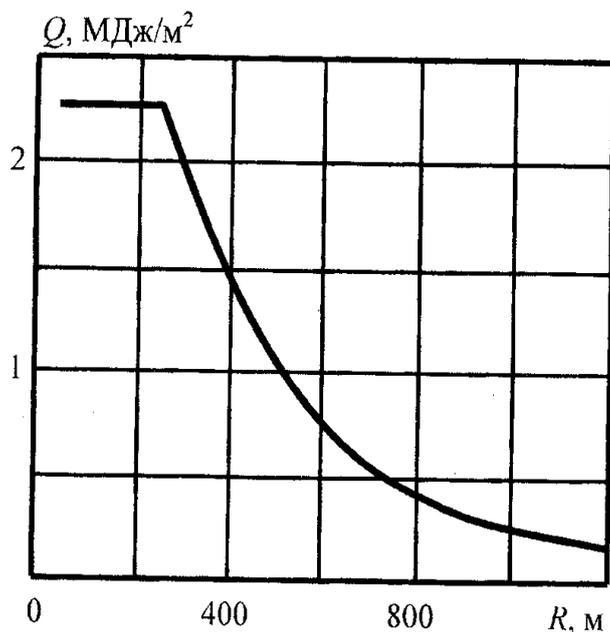


Рисунок 50. Зависимость светового импульса от расстояния при сгорании пропано-воздушной смеси от разлива 1000 т жидкого пропана

Таблица 34

Импульсы теплового излучения, МДж/м^2 , длительностью τ , вызывающие воспламенение материалов

Материал	τ , сек			
	1,56	3,16	8,71	24,0
1	2	3	4	5
1. Древесина сухая (сосна)	0,58	0,67	0,88	1,00
2. Доски после распиловки (сосна, ель)	1,67	1,76	1,88	2,10

продолжение таблицы 34

1	2	3	4	5
3.Доски, окрашенные в темный цвет	0,21	0,25	0,33	0,42
4.Кровля мягкая (толь, рубероид)	0,54	0,59	0,67	0,84
5.Черепица красная (оплавленная)	0,84	1,05	1,26	1,67
6.Стружка, солома, сено, бумага темная	0,12	0,17	0,21	0,25
7.Ткань вискозная черная	0,04	0,05	0,08	0,09
8.Ткань хлопчатобумажная коричневая	0,29	0,33	0,42	0,50
9.Сукно серое, брезент, кожа коричневая	0,62	0,77	0,84	1,26

Для промышленных аварий характерны следующие параметры огненного шара: $M \sim 50т$, $R \sim 100м$, $t^* \sim 14с$.

Таблица 35

Состояние стекла при потоке излучения, $кВт/м^2$, и трех значениях температуры

Стекло	400 ⁰ С	1000 ⁰ С	1800 ⁰ С	Состояние стекла
Обычное	3,5	5,25	7,0	Растрескивание
Закаленное	14,0	14,0	14,0	Деформаций нет
С пленочным покрытием, теплозащитное со светопропусканием 80%				
Незакаленное	5,25	5,25	3,5	Растрескивание
Закаленное	14,0	14,0	14,0	Деформаций нет
Окрашенное в массу, теплозащитное со светопропусканием 40%				
Незакаленное	3,5	3,5	7,0	Растрескивание
Закаленное	14,0	14,0	14,0	Деформаций нет

При взрыве зарядов бризантных ВВ с поверхности фронта ударной волны перед ним идет поток излучения $\sigma \cdot T_{\phi}^4$, где σ - постоянная Стефана-

Больцмана, T_{ϕ} - температура за фронтом волны. Таким образом, ударная волна, распространяемая по нагретому газу, и температура на фронте волны выше, чем дают соотношения, приведенные в работе [7]. Температура прогрева перед фронтом T_p пропорциональна величине T_{ϕ}^4 , т.е. быстро растет с давлением ΔP_{ϕ} . Однако при умеренных давлениях ($\Delta P_{\phi} < 10$ МПа) описанным эффектом можно пренебречь.

При ядерном взрыве разогретая до нескольких десятков миллионов градусов масса вещества боеприпаса излучает большое количество энергии в виде рентгеновских лучей, поглощаемых воздухом. Нагретые газообразные продукты взрыва и воздух образуют огненный шар - ярко светящуюся шарообразную область, увеличивающуюся в размерах и поднимающуюся вверх со скоростью до 100 м/с. Яркость огненного шара ядерного взрыва остается постоянной, независимо от мощности взрыва.

Тепловое воздействие на объекты связано со световым излучением огненного шара. Согласно закону Стефана-Больцмана суммарная величина свето-вого импульса P_s , Вт, зависит от температуры $T(t)$, К:

$$P_s = 4 \cdot \pi \cdot R_F^2 \cdot \sigma \cdot T^4,$$

где R_F - радиус огненного шара, м; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт / (м²·К⁴) - константа.

Здесь P_s и T являются функциями времени, причем максимум $P_{s,m} = P_s(t_m)$ в момент времени t_m при воздушном взрыве определяется в зависимости от мощности взрыва W , кт (длительность светового импульса $\tau \approx 10 \cdot t_m$).

$$P_{s,m} = 1,674 \cdot 10^{13} \cdot \sqrt{W}, t_m = 0,032 \cdot \sqrt{W}$$

Изменение выделившейся энергии во времени $E(t)$ определяется интегрированием функции $P_s(t)$ по времени, причем общая световая энергия, выделяемая в воздушном ядерном взрыве $E_{\text{общ}} \approx 1/3 \cdot W = 1,395 \cdot 10^{12} \cdot W$, Дж.

Обезразмеренные функции времени $\bar{P} = P_s / P_{s,m} \cdot (t/t_m)$, $\bar{E} = E / E_{\text{общ}} \cdot (t/t_m)$ для воздушного ядерного взрыва приведены на рисунке 51.

Световой импульс q , Вт/м, действующий на единицу площади на расстоянии R , определяется делением P_s на величину поверхности сферы $S = 4 \cdot \pi \cdot R^2$ с учетом потери энергии от различных факторов:

$$q = K \cdot P_s / S = K \cdot \sigma \cdot T^4 (R_F / R)^2.$$

Здесь K - коэффициент пропускания, учитывающий потери энергии в зависимости от расстояния и прозрачности воздуха. При видимости 80км значения K таковы:

$R, \text{м}$	160	480	1120	3200	11000
K	0,97	0,93	0,90	0,82	0,7

Дозу теплового излучения Q , Дж/м² на расстоянии R можно подсчитать делением $E_{\text{общ}}$ на поверхность S с учетом коэффициента K :

$$Q = K \cdot E_{\text{общ}} / S = 1,11 \cdot 10^{11} \cdot K \cdot W / R^2.$$

При наземном взрыве W следует умножить на 2. Однако при таком взрыве количество световой энергии, достигающее объекта, составляет 0,5 - 0,75 от энергии воздушного взрыва. Поэтому приведенные выше формулы пригодны без изменений и для наземного взрыва.

Пример 7.

При взрыве мощностью $W=500$ кт максимум светового импульса $P_{s,m} = 1,674 \cdot 10^{13} \cdot 500 = 3,74 \cdot 10^{14}$ Вт при $t_m = 0,032\sqrt{500} = 0,715$ с, длительность импульса $\tau = 7,15$ с. Общая световая энергия $E_{\text{общ}} = 1,395 \cdot 10^{12} \cdot 500 = 6,975 \cdot 10^{14}$ Дж. Доза теплового излучения, например, на расстоянии 15 км $Q = 1,11 \cdot 10^{11} \cdot 0,7 \cdot 500 / 15000^2 = 1,73 \cdot 10^5$ Дж/м².

С помощью графиков на рисунке 51 легко построить размерные функции $P_s(t)$, $E(t)$, $q(t)$

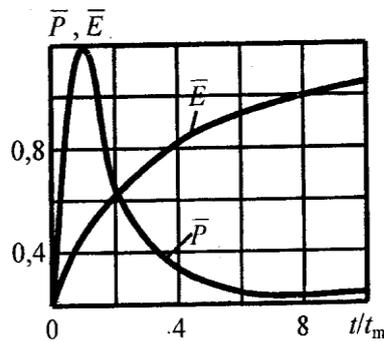


Рисунок 51. Зависимость безразмерных светового импульса и доли энергии светового излучения от времени

Так, в момент времени $t_i=2$ с имеем:

$$t_i = t_i/t_m = 2/0,715 = 2,8; \bar{P}_i = 0,26; \bar{E}_i = 0,58;$$

$$P_{si} = P_i \cdot P_{s,m} = 0,26 \cdot 3,74 \cdot 10^{14} = 9,724 \cdot 10^{13} \text{ Вт};$$

$$E_i = \bar{E}_i \cdot E_{\text{общ}} = 0,58 \cdot 6,975 \cdot 10^{14} = 4,05 \cdot 10^{14} \text{ Дж};$$

на расстоянии 15 км:

$$q_i = 0,7 \cdot 9,724 \cdot 10^{13} / (4 \cdot \pi \cdot 15000^2) = 2,41 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$$

9.4 Критерии поражения тепловым излучением при взрыве

Приемником излучения будем называть любой объект, который может получить ожог или сгореть. Человек, ВВ, ракетные топлива, здания и прочие строительные сооружения - все это примеры приемников различного типа. Для оценки степени поражения приемника будем пользоваться пороговой кривой, которая схематически показана на ри-сунке 52 и представляет собой зависимость, связывающую поток тепловой энергии \bar{q} и полную энергию \bar{Q} , падающие на единицу поверхности.

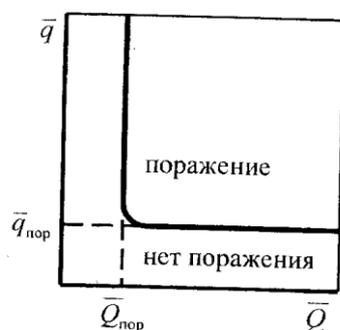


Рисунок 52. Типичный вид \bar{q} - \bar{Q} диаграммы ($\bar{Q}_{пор}$ и $\bar{q}_{пор}$ пороговые значения приведенных величин)

При большом времени теплового воздействия, превышающем время, необходимое для достижения равновесия, порог поражения будет определяться исключительно тепловым потоком $\bar{q}_{пор}$. Напротив, при импульсных воздействиях короткой длительности, когда отсутствует сколько-нибудь заметный перенос энергии вовне от места поглощения, порог будет определяться лишь энергией $\bar{Q}_{пор}$. Значения \bar{q} и \bar{Q}

превышающие пороговые, будут вызывать поражение приемника, если же либо q либо Q , меньше, чем пороговые значения, то поражение отсутствует. Очевидно, что для оценки поражения человека, ВВ, ракетных топлив и энергетических материалов вместо $q - Q$ кривой, изображенной на рисунке 52, может быть использована зависимость $Q - t$ или $q - t$.

Примером одного из наиболее совершенных пороговых критериев поражения лучистой энергией служит критерий ожога палочек и колбочек глаза. В работе [121] определялась взаимосвязь между энергией Q , временем теплового воздействия t и размером изображения d_i . Результаты эксперимента представлены на рисунке 53.

Поражение глаза носило частичный характер и не приводило к полной слепоте, так как ожог локализовался лишь на тех участках сетчатки, где фокусировалось изображение. Для больших экспозиций, больше 1с, критерий поражения измеряется постоянной энергией, равной более 400 кДж/м^2 . Большие экспозиции не имеют практического значения, так как они существенно превышают время моргания глаза, составляющее по порядку величины 10^{-2} с , и поэтому человек успеет среагировать на внешнее воздействие соответствующим образом, зная о возможности поражения глаза. Для малых экспозиций и достаточно больших изображений критерий поражения измеряется постоянной энергией, равной $1,7 \text{ кДж/м}^2$. Так как энергия равна интегралу по времени от теплового потока, то полученный критерий означает, что для огненных шаров с коротким временем жизни вид зависимости $q(t)$ не

имеет значения, а существенна лишь полная энергия, сообщенная приемнику. Если площадь изображения мала, то для поражения нужно сообщить приемнику больше энергии, так как некоторое количество энергии будет рассеиваться в результате кондуктивного переноса в соседние участки глаза.

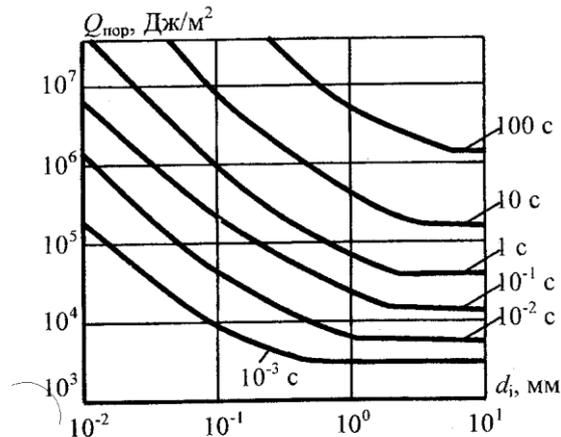


Рисунок 53. Пороговые кривые ожога сетчатки у приматов ($Q_{\text{пор}}$ – пороговая энергия ожога; d_i – диаметр изображения; t – время облучения)

При очень больших временах экспозиции порядка 10-100с критерий поражения дает в пределах постоянный максимальный тепловой поток, величина которого изменяется в зависимости от размера изображения, и при большом времени экспозиции основное значение приобретает скорость поглощения энергии в веществе. Чтобы можно было использовать рисунок 53 для оценок, необходимо установить размер изображения. Используя соотношения геометрической оптики, получим следующее уравнение:

$$d_i / \lambda = D / R, \quad (156)$$

где λ - фокусное расстояние глаза человека,

которое приблизительно равно 17мм; D - диаметр огненного шара; R – расстояние от огненного шара до приемника.

На рисунке 54 приведена диаграмма $q - t$, разделяющая области терпимой и нетерпимой боли - критерий, близкий к ожогу второй степени. Эмпирический критерий, реализованный на рисунке 54, основан на том, что при тепловом облучении нестерпимая боль наступает тогда, когда температура слоя толщиной 0,1мм под поверхностью кожи превысит $44,8^{\circ}\text{C}$. Когда достигается эта температура, боль резко усиливается, спустя некоторое время боль спадает и затем исчезает вовсе. Основная реакция указывает на полный ожог облученного участка кожи. Как видно из рассматриваемого графика, облучение тепловым потоком $1,4 \text{ Вт/м}^2$ не вызывает болевых ощущений независимо от времени облучения. Это объясняется усилением притока крови до периферийных участков, что препятствует локальному повышению температуры до порогового уровня, равного $44,8^{\circ}\text{C}$. При одинаковом облучении точка болевого ощущения может быть достигнута быстрее, если предварительно подогреть кожу и наоборот.

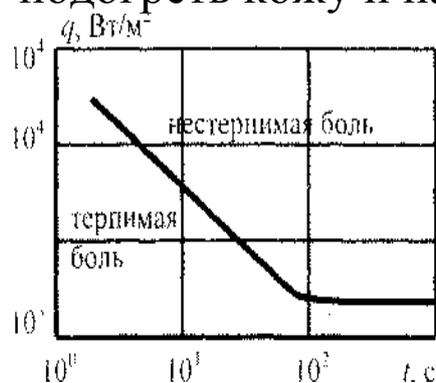
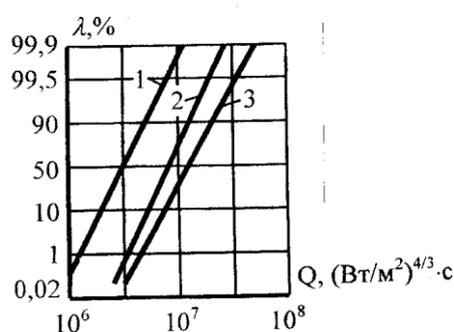


Рисунок 54. Болевой порог при лучистом ожоге незащищенной кожи

Степень поражения человека (процент потерь λ) от действия тепловой радиации при быстром сгорании углеводородов и дефлаграционных взрывах газо-пароводушных смесей оценивают по величине теплового потока q и экспозиции t^* . Время пребывания в зоне облучения при пожаре зависит от конкретных условий, тогда как при дефлаграционных взрывах время t^* может быть принято равным времени существования огненного шара согласно рисунку 48.

Поражение различной степени человека при действии тепловой радиации можно оценить по графику на рисунке 55 [140].



1- первая степень поражения; 2- вторая степень поражения; 3- третья степень поражения (летальный исход).

Рисунок 55. Зависимость процента потерь людей без защитной одежды от воздействия тепловой радиации при горении углеводородов

На графике рисунке 55 дана зависимость Q от параметра тепловой радиации $S = g^{4/3} \cdot t^*$ (Вт/м^2)^{4/3}·с. При этом степеням поражения соответствуют ожоги кожи на глубину $< 0,12\text{мм}$ - 1 степень, менее 2мм - 2 степень и более 2мм - 3 степень.

Поражение людей тепловым излучением

возможно, как при аварийных взрывах газопаровоздушных смесей в помещениях, так и в открытом пространстве, при выбросах или разливах сжиженных газов, а также при утечке газа из газопроводов или негерметичного оборудования.

Переносимость человеком тепловой радиации q (при количестве переданной теплоты K) в производственных условиях ограничена следующими длительностями t^* , соизмеримыми с временами воздействия при взрывах в помещениях:

$g, \text{кВт/м}^2$	$[\text{кал}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})]$	$K, \text{Дж}$	$[\text{кал}]$	$t^*, \text{с}$
7,0	10,0	5,85	1,4	5-11
8,75	12,5	5,22	1,25	3-8
10,5	15,0	5,0	1,20	3-7
14,0	20,0	2,5	0,60	1-5

Интенсивность воздействия при дефлаграционном взрыве значительно превышает указанные предельные по переносимости величины, причем температура при взрыве достаточно высока, и смертельный исход может оказаться неизбежным.

Снизить риск поражения людей возможно за счет повышения надежности технологического оборудования и снижения вероятности появления теплового источника зажигания.

Воздействие на открытые участки тела незащищенного человека тепловых излучений, характерных для воздушных ядерных взрывов, может вызвать ожоги четырех степеней в зависимости от величины дозы Q , согласно таблице 36.

Пример 8.

Тепловое воздействие при взрыве автоцистерны с пропаном.

Произошел взрыв автоцистерны, заполненной 16т пропана. Требуется оценить:

- диаметр, время жизни и температуру огненного шара, который может образоваться при взрыве перегретого пропана;

- на каком расстоянии от места аварии возможны болезненные ожоги открытых участков кожи;

- на каком расстоянии возможно поражение органов зрения у людей, наблюдавших за взрывом в течение 1 с.

Таблица 36
Поражение человека тепловым излучением

Степень ожога	Q, кДж/м ²	Характер поражения и последствия
1	2	3
Первая	100-200	Покраснение и припухлость кожи, сопровождающиеся некоторой болезненностью. Работоспособность не теряется. Ожоги быстро заживают.
Вторая	200-400	Образование пузырей, наполненных жидкостью. Потеря работоспособности. Требуется лечение.
Третья	400-600	Полное разрушение кожного покрова, образование язв. Требуется длительное лечение.
Четвертая	Более 600	Омертвление подкожной клетчатки, мышц и костей, обугливание. Вероятен смертельный исход.

С помощью уравнения (149) можно оценить диаметр огненного шара, если вещество дает при взрыве температуру около 3600°K:

$$D = 3,86 \cdot M^{0,320} = 3,86 \cdot (16 \cdot 10^3)^{0,320} = 97,3 \text{ м},$$

С помощью уравнения (150) можно оценить время жизни этого огненного шара для той же температуры 3600°K:

$$t^* = 0,299 \cdot M^{0,320} = 0,299 \cdot (16 \cdot 10^3)^{0,320} = 7,5 \text{ с}.$$

Однако средняя температура огненного шара зависит от природы горючего вещества: для пропана соответствующая температура равна приблизительно 1350°, а не 3600°K.

Чтобы оценить диаметр более холодного огненного шара при взрыве пропана и горячего огненного шара с температурой около 5000°K, образующегося при детонации твердого ВВ, воспользуемся законом подобия, который выражается формулой (146). В случае перегретого пропана диаметр огненного шара равен:

$$D_1 = \frac{97,3}{(1350/3600)^{1/3}} = 135 \text{ м}$$

Аналогичным образом можно ввести поправку на температуру при оценке времени жизни огненного шара. Воспользовавшись формулой (147), получим для пропана:

$$t_1^* = \frac{7,5}{(13500/3600)^{1/3}} = 197,4 \text{ с}$$

Чтобы определить пороговое расстояние, на котором возникнут ожоги открытых участков кожи, воспользуемся данными рисунка 54, которые позволяют оценить пороговую величину лучистого потока. Для огненного шара, образовавшегося при взрыве автоцистерны с пропаном, при времени излучения 197,4с пороговое значение, согласно рисунка 54, равняется приблизительно 1,4 кВт/м². Вычислим величину \bar{q} . Для взрыва перегретого

пропана эта величина равна:

$$\bar{q} = \frac{1,4 \cdot 10^7}{(1350)^4} \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4) \approx 4,21 \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$$

Этому числу соответствует значение величины \bar{R} , равное $95 \text{ м} \cdot \text{К}^{1/3}/\text{кг}^{1/3}$. Отсюда можно определить R для случая взрыва перегретого пропана:

$$R = 95 \cdot M^{1/3}/T^{1/3} = 95 \cdot (16 \cdot 10^3)^{1/3}/(1350)^{1/3} = 218 \text{ м}.$$

Для оценки возможности поражения органов зрения воспользуемся рисунком 53. При этом приходится применять метод последовательных приближений, так как размер изображения d_i нельзя определить до тех пор, пока не будет вычислено расстояние R . Если принять, что изображение имеет достаточно большие размеры, то при времени экс-позиции 1 с пороговая тепловая энергия $Q_{\text{пор}}$ будет приблизительно равна $40 \text{ кДж}/\text{м}^2$. Теперь можно вычислить величину Q и установить приведенное расстояние R . Для взрыва перегретого пропана имеем:

$$Q = \frac{(1,1 \cdot 10^4) \cdot (4 \cdot 10^4)}{(1,6 \cdot 10^4) \cdot (1350)^{2/3}} = 1,55 \text{ мДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{кг}^{1/3} \text{К}^{2/3}).$$

Зная эту величину, найдем приведенное пороговое расстояние:

$$\bar{R} = \frac{(1350)^{1/3} \cdot R}{(16 \cdot 10^3)^{1/3}} = 230 \text{ м} \cdot \text{К}^{1/3}/\text{кг}^{1/3}, \text{ откуда } R = 527 \text{ м}.$$

Далее можно вычислить размер изображения и пороговую тепловую энергию $Q_{\text{пор}}$ и проверить правильность выбора исходного значения $Q_{\text{пор}}$

Размер изображения вычисляется по формуле (122):

$$d_i = \lambda \cdot D/R = 17 \cdot 135/527 = 4,34 \text{ мм}.$$

При размере изображения 4,34мм и времени облучения 1с тепловая энергия $Q_{\text{пор}} = 40\text{кДж/м}^2$, что соответствует принятому значению. Следовательно, исходное значение было выбрано точно и итераций не требуется.

Отметим, что при взрыве перегретого пропана частичная потеря зрения наступает на большем расстоянии от источника излучения, чем ожог открытых участков кожи. Эта закономерность объясняется тем, что хрусталик глаза фокусирует тепловую энергию на небольшой поверхности сетчатой оболочки глаза. Пороговые расстояния поражения лучистой энергией оказались больше расстояний, определяющих границы поражения воздушной ударной волной.

ГЛАВА 10. ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ПОРАЖЕНИЯ ЛЮДЕЙ И ПОВРЕЖДЕНИЯ СООРУЖЕНИЙ ПРИ АВАРИЙНОМ ВЗРЫВЕ

10.1 Общие сведения

При аварийных взрывах к основным поражающим факторам относятся ударная волна, осколочное поле и тепловая радиация. Поражающий эффект может усиливаться при возбуждении вторичных взрывов – при возгорании и взрыве объектов с энергоносителями в результате воздействий первичного взрыва (так называемый эффект «домино»).

Поражающее действие ударно-волновой нагрузки определяется функцией ее изменения во времени $P(t)$. Результат действия нагрузки на конструкции сооружений устанавливается решением уравнений динамики сооружений, в которых учитываются инерционные, жесткостные и прочностные конструкции. Такой подход, очевидно, не может быть применен к оценке поражения человека. Его также затруднительно использовать при оценке степеней повреждений объектов сложной структуры, хотя принципиальная возможность подробного анализа существует и его следует применять при проектировании объектов большой важности и

стоимости.

Установлено, что реакция сооружения на динамические воздействия типа взрывных волн и ударов существенно связана с отношением длительности воздействия и характерного времени (релаксации) объекта. Для упругих систем характерное время соответствует периоду основного тона собственных колебаний.

При взрыве заряда бризантного ВВ длительность нагрузки τ_+ мала, а давление на небольших расстояниях очень велико, но резко падает с увеличением расстояния. Поэтому на радиусах, где давление превышает некоторое пороговое значение, эффект воздействия на людей и объекты определяется только импульсом. При взрывах больших масс ВВ, ядерных взрывах и на значительных расстояниях, представляющих практический интерес, длительность воздействия велика, и эффект определяется амплитудой давления. Аналогичная ситуация наблюдается при взрывах газопаровоздушных смесей, при которых давления в волнах сжатия не превышают десятков атмосфер. Однако в обеих ситуациях существует зона, в которой эффект определяется как давлением, так и импульсом.

Для приближенной оценки степени повреждения

объектов используют обобщенные экспериментальные данные и результаты анализа прошлых аварий, позволяющие устанавливать законы поражения или степень риска материального ущерба и поражения людей.

Применительно к ударно-волновым нагрузкам законы поражения, основанные на данных опыта, представляют в виде зависимостей вероятности поражения G от параметров, характеризующих воздействие амплитуды давления P и удельного импульса I . Зависимости $G(I, P)$ называются параметрическими законами поражения. Поскольку амплитуда давления и импульс конкретного взрыва являются функциями массы энергоносителя ($ВВ$, жидкого топлива) и расстояния до центра взрыва, от параметрического закона поражения легко перейти к координатному закону поражения.

При взрывах энергоносителей в оболочках и боеприпасов поражение людей возможно действием разлетающихся осколков. При выбросах жидких энергоносителей из различных емкостей, их быстром испарении с образованием облаков газопаровоздушных смесей и дефлаграционных взрывах или быстром сгорании, кроме механического действия волн сжатия, наблюдается поражающее действие тепловой радиацией.

При взрывных и ударных воздействиях на различные объекты им передается определенное количество энергии, вызывающей некоторые изменения состояния: деформации или разрушения конструкций, поражение людей, возгорание и детонацию энергоносителей. При взрывах передача энергии осуществляется взрывными и ударными волнами, а также ударами осколков оболочек и обломков предметов. Указанные процессы количественно описываются различными методами, однако до настоящего времени нет единого подхода к оценке критических параметров воздействий, и сравнение различных подходов часто дает противоречивые результаты. В связи с этим и с учетом накопленных экспериментальных данных, в частности, опубликованных в докладах на международном симпозиуме по детонации и взрывчатым веществам [141], представляется целесообразным для оценки поражающего действия взрыва и удара использовать энергетический подход.

10.2 Прямое и побочное действие ударной волны на человека

Первые сведения о вредном воздействии взрыва

на человека опубликованы еще в 1768г. Однако знания о механизмах поражающего действия взрыва на человека оставались очень неполными вплоть до первой мировой войны, когда стали гораздо лучше понимать физические принципы взрыва. Начиная с этого времени были затрачены значительные усилия на изучение механизма поражения человека взрывом. Каждая ситуация обладает неповторимыми условиями, с присущим только ей расположением деревьев, зданий, холмов и т.п. элементов, которые могут поглощать энергию взрывной волны или отражать ее, усиливая воздействие волны на человека. В связи с большим влиянием, которое оказывают перечисленные факторы на результат взаимодействия в системе «взрыв-приемник» (человеческое тело), ниже рассматривается лишь ограниченная система упрощенных критериев, позволяющих оценить поражение человека взрывной волной. Предполагается, что «приемник» (тело человека), на который набегает взрывная волна, расположен в свободном пространстве на плоской ровной поверхности земли в положении стоя. За исключением известных ситуаций, когда возникают отраженные волны, указанное состояние отвечает наиболее опасным условиям. Поражающее действие воздушных взрывных волн удобно разделить на две

категории: прямое или первичное действие и побочное или вторичное действие.

Прямое или первичное поражающее действие взрывной волны связано с изменением давления в окружающей среде в результате прихода воздушной взрывной волны. Млекопитающие особо чувствительны к таким факторам, как избыточное давление, скорость повышения давления до пикового значения после прихода взрывной волны и длительность взрывной волны. Из других факторов, которые определяют степень поражения, нанесенного взрывной волной, можно назвать внешнее атмосферное давление, размер и вид животного и его возраст. Органы тканей обладают наиболее высокой чувствительностью к первичному поражающему действию взрывной волны [121]. Таким образом, ткани легких, наполненные воздухом, страдают от действия взрывной волны больше, чем какой-либо другой жизненно важный орган. Ухо, хотя и не относится к жизненно важным органам, также проявляет очень высокую чувствительность. Этот орган реагирует на чрезвычайно низкие уровни потока энергии порядка 10^{-12} Вт/м², что в пересчете на давление составляет приблизительно $2 \cdot 10^{-5}$ Па. Эта ничтожная сила вызывает отклонение барабанной перепонки на величину, меньшую

диаметра одной молекулы [121].

Повреждения легких являются прямой или косвенной причиной многих патофизиологических эффектов, наблюдаемых при поражении человека взрывной волной [121]. К этим повреждениям относятся легочные кровотечения и отек, разрыв легких, инсульт с закупоркой воздухом сердца и центральной нервной системы, потеря дыхательного запаса и образование множественных мелких рубцов на легких. К другим неприятным последствиям относятся разрыв барабанной перепонки, повреждение среднего уха, повреждение гортани, трахеи, брюшной полости, нервных окончаний спинного мозга и различных других органов тела.

Побочные эффекты, сопровождающие действие взрывной волны, можно разделить на три основные группы: вторичные, третичные и смешанные.

К вторичным эффектам относится удар осколками, которые либо образуются при разрыве стен взор-вавшего аппарата, либо представляют собой предметы, находящиеся вблизи места взрыва и ускоряющиеся под действием взрывной волны. Характеристики, которые определяют степень повреждения, причиняемого человеку, обусловлены прониканием осколков в тело. К ним относятся масса, скорость, форма, плотность, площадь

миделева сечения и угол удара. К патофизиологическим последствиям относятся разные проникающие ранения внутренних органов, грубые травмы, переломы черепа и костей.

К третичным эффектам относятся перенос тела как целого воздушной волной и последующий тормозящий удар. В этом случае под действием давления и аэродинамического напора взрывной волны тело человека поднимается в воздух и пролетает некоторое расстояние. Повреждения могут возникать либо на стадии ускорения, либо во время тормозящего удара. Степень повреждения, обусловленная тормозящим ударом, намного более значительна и определяется изменением скорости при ударе, а также временем и расстоянием, на котором происходит торможение, типом ударяющей поверхности и площадью соударения. При подобных ускорениях или тормозящих ударах голова человека оказывается наиболее уязвимой, но и одновременно и лучше всего защищенной частью тела относительно повреждений. При тормозящем ударе помимо повреждения головы возможны также травмы жизненно важных внутренних органов и переломы костей.

10.3 Поражения органов дыхания воздушной взрывной волной

Части тела, отличающиеся разницей в плотности соседних тканей, наиболее чувствительны к поражающему действию взрывной волны. Легкие содержат множество воздушных мешочков или альвеол, которые обладают меньшей плотностью, чем окружающие ткани, и, следовательно, очень чувствительны к действию волны [121]. Из-за относительно низкой плотности альвеол в результате имплозии стенок брюшной полости и грудной клетки и движения диафрагмы вверх под действием взрывной волны происходит сжатие альвеол. Если амплитуда давления и скорость увеличения внешнего давления невысокая и находятся в допустимых пределах, то тело способно компенсировать повышение внешнего давления за счет движения грудной клетки и увеличения внутреннего давления. Однако, когда движение стенок грудной клетки и плевры внутрь происходит слишком быстро и с большой амплитудой, то органы тела, размещаемые в грудной клетке, включая легкие, заметно деформируются, в результате возникают кровотечения в легких, сдвиг и расширение легких вдоль и вокруг значительно

более жестких крупных бронхов и легочных артерий [121]. В зависимости от характера и обширности кровотечения и в результате закупорки артерий воздухом смерть может наступить очень быстро.

Изучение реакции тела человека на действие внешних сил шло по двум направлениям. Одни исследовали возможность построения биодинамических моделей, имитирующих характеристики отклика реакции человеческого тела. Другие авторы проанализировали результаты экспериментов, проведенных на лабораторных животных, и экстраполировали эти результаты на человекообразных, используя определенные допущения.

К основным факторам, которые определяют степень поражения взрывной волной, относятся характеристики взрывной волны, внешнее атмосферное давление, тип животного-мишени, его масса и геометрическая ориентация относительно взрывной волны, а также окружающие предметы. Так как в большинстве случаев можно точно вычислить давление и удельный импульс, достигаемые на заданном расстоянии от центра взрыва, то построение кривых, дающих границы летального исхода или выживаемости в координатах давление-импульс, представляется более целесообразным. Ситуация, в которых для

достижения определенного уровня поражения требуются минимальные давление и импульс проходящей волны, отвечают таким позициям человека-мишени, когда он стоит или лежит вблизи плоской отражающей поверхности, по нормали к которой набегают взрывная волна. Однако учет формы и типа отражающей поверхности угла прихода взрывной волны и расстояния от человека-мишени до отражающей поверхности представляет значительные трудности. Кроме того, в реальных условиях вблизи человека, оказавшегося в зоне действия взрывной волны, могут отсутствовать отражающие поверхности, что также ограничивает применение кривых летального исхода, построенные с учетом отражения от соседних поверхностей.

В случае взрывной волны в свободном пространстве воздействие на человека происходит с максимальным эффектом при расположении тела человека вдоль фронта волны, при этом его лицо может быть обращено в любую сторону. Эта позиция представляется весьма вероятной и будет рассматриваться ниже в качестве основной при оценке первичного поражения человека взрывной волной, образующейся при аварийных взрывах.

Если упростить законы подобия, то согласно [121] можно прийти к следующим закономерностям.

1. Поражающее действие избыточного давления

приходящей волны зависит от внешнего атмосферного давления и определяется величиной:

$$\bar{P}_s = P_s / P_p, \quad (157)$$

где \bar{P}_s – безразмерное пиковое давление в волне;

P_s – пиковое избыточное давление в приходящей волне;

P_p – атмосферное давление.

2. Поражающее действие, обусловленное длительностью положительной фазы взрывной волны, зависит от атмосферного давления и массы человека-мишени и определяется величиной:

$$\bar{T} = T \cdot P_0^{1/2} / m^{1/3}, \quad (158)$$

где T – приведенная длительность положительной фазы волны; m – масса тела человека.

3. Импульс i_s можно аппроксимировать следующей формулой:

$$i_s = P_s \cdot T / 2 \quad (159)$$

Формула (159) эквивалентна допущению о том, что волна имеет треугольный профиль. Это допущение плохо выполняется в случае «длинных» взрывных волн, профиль которых приближается к прямоугольному, так как при этом занижается удельный импульс.

Если применить законы подобия для пикового давления и длительности положительной фазы, то можно получить для приведенного удельного импульса:

$$\bar{i}_s = \bar{P}_s \cdot \bar{T} / 2 \quad (160)$$

На рисунке 56 показаны кривые выживаемости в зависимости от избыточного давления и удельного импульса приходящей волны.

На рисунке 57 показано изменение атмосферного

давления в зависимости от высоты над уровнем моря.



Рисунок 56. Кривые выживания при поражении органов дыхания человека

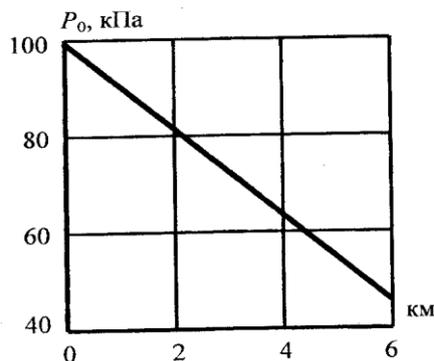


Рисунок 57. Изменение атмосферного давления в зависимости от высоты над уровнем моря

Следует отметить, что кривые выживания отвечают процентам выживания, и, чем выше безразмерное давление и импульс в данной комбинации, тем меньше процент выживания. Представление пороговых кривых в указанных координатах обладает тем преимуществом, что в таком виде кривые можно непосредственно применять при различных высотах над уровнем моря, т.е. при различных атмосферных давлениях, и для людей с различной массой тела. Если

избыточное давление и импульс приходящей волны известны, то можно вычислить \bar{P}_s и \bar{i}_s . Для этого нужно знать атмосферное давление и массу человека. Чтобы найти массу человека, можно воспользоваться демографическими данными. Рекомендуется использовать массу: 5кг - для грудных детей, 25кг - для детей младшего возраста, 55кг - для взрослых женщин, 70кг - для взрослых мужчин.

Пример 9.

Прямое поражение человека взрывной волной.

Рассмотрим следующую ситуацию: мужчина массой 75кг был поражен взрывной волной с избыточным давлением 70 кПа и длительностью 10 мс на высоте 0м над уровнем моря. Каковы его шансы остаться в живых?

Согласно рисунка 57 на высоте 0м атмосферное давление равно 101кПа. Переходя от избыточного давления 70кПа к безразмерному избыточному давлению, получим:

$$\bar{P}_s = \frac{7 \cdot 10^4}{1,01 \cdot 10^5} = 0,693$$

Вычисляя приведенный импульс

$$\bar{i}_s = \frac{7 \cdot 10^4 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 75^{1/3} \cdot (1,01 \cdot 10^5)^{1/2}} = 0,61 \text{Па}^{1/2} \cdot \text{с} / \text{кг}^{1/3}$$

из рисунка 56 найдем, что избыточное давление ниже порогового, и поэтому органы дыхания мужчины не будут поражены.

10.4 Поражение воздушной взрывной волной органов слуха, головы и тела при ударе

Ухо - это чувствительный орган, преобразующий звуковые волны в нервные импульсы и реагирующий в диапазоне от 20 до $20 \cdot 10^3$ Гц. Этот орган может откликаться на удивительно низкие уровни потока энергии порядка 10^{-12} Вт/м², которые вызывают отклонения барабанной перепонки.

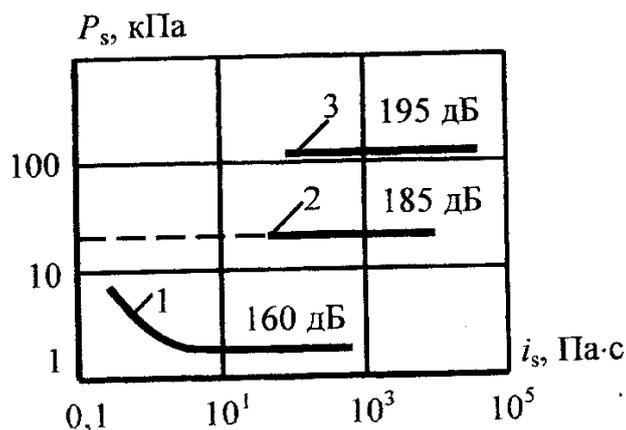
Однако ухо не способно верно реагировать на импульсы, период которых меньше 0,3 мс: такие импульсы вызывают одно отклонение большой амплитуды. Именно эта реакция может стать причиной повреждения уха. Ухо человека делится на наружное, среднее и внутреннее. Наружное ухо усиливает избыточное давление звуковой волны приблизительно на 20% и позволяет установить положение источника звука. Разрыв барабанной перепонки, которая отделяет наружное ухо от среднего уха, привлекает наибольшее внимание медиков, хотя этот вид травмы не относится к особо опасным повреждениям органа слуха.

Среднее ухо можно рассматривать как прибор, осуществляющий выравнивание и усиление сигнала. Он содержит два механизма демпфирования. Время релаксации обоих механизмов составляет примерно 5-10 мс, что превышает время релаксации взрывных волн с быстро нарастающим давлением на фронте. Однако если разрыв барабанной перепонки происходит после перемещения внутрь во время положительной фазы нагружения взрывной волной, то перемещение наковальни и молоточка наружу во время отрицательной фазы нагружения будет менее вероятным, чем при неповрежденной барабанной

перепонке. В этом случае разрыв барабанной перепонки может оказаться полезным. Тем не менее максимальное избыточное давление и время нарастания давления до максимума определяют характеристики отрицательной фазы волны и, следовательно, имеют основное значение [121].

На рисунке 58 приведены критерии поражения уха человека взрывной волной.

Экспериментальные данные [121] показывают, что 50%-ная вероятность разрыва барабанной перепонки достигается при избыточном давлении 103 кПа для волн с крутым фронтом, имеющих длительность от 3 мс до 0,4с атмосферном давлении 101 кПа. Нижний порог разрыва барабанной перепонки в случае волн с крутым фронтом составляет 54,5 кПа.



1 - граница временной потери слуха; 2 - нижний порог разрыва барабанной перепонки; 3 - 50%-ная вероятность разрыва барабанной перепонки

Рисунок 58. Пороговые кривые поражения органов слуха человека при нормальном угле падения взрывной волны на ухо

Пример 10.

Повреждение органов слуха человека.

Рассмотрим следующую ситуацию: человек был подвержен действию взрывной волны с избыточным давлением 10 кПа и импульсом 100 Па·с. Как это отразится на его органе слуха?

Из рисунка 58 видно, что 10 кПа ниже порогового значения, которое равно 35 кПа, и, следовательно, барабанная перепонка не пострадает.

В процессе переноса тела как целого или трансляции избыточное давление и импульс взрывной волны, действующие на тело, приподнимают тело и переносят его по воздуху. Перенос тела с последующим тормозящим ударом при падении классифицируется как третичное поражающее действие взрывной волны. Опасность получения травмы создается на стадии ускорения, либо в процессе тормозящего удара [121]. Однако тяжесть повреждения более высокая при тормозящем ударе и определяется изменением скорости при ударе, временем и расстоянием торможения, типом поверхности удара и площадью поверхности тела.

Хотя при тормозящем ударе голова является наиболее уязвимой относительно механических повреждений частью тела, однако она лучше защищена. Критерий поражения при переносе тела

должен опираться на возможность травмы черепа или сотрясение мозга. Однако из-за того, что место удара на теле после переноса будет ориентировано, скорее всего случайным образом, существует другое мнение, согласно которому необходимо учитывать случайный фактор при определении ожидаемой вероятности поражения при ударе. Поэтому ниже будут рассмотрены оба типа удара: с преимущественным поражением головы и со случайным положением места удара на теле.

Так как задача о тормозящем ударе включает большое количество параметров, то используем некоторые упрощающие допущения. Во-первых, примем, что поражение при переносе тела происходит в момент тормозящего удара тела о твердую поверхность. Далее, предполагается, что поражение при трансляции зависит только от скорости удара. То, что рассматривается только удар по поверхности одного типа, т.е. по твердой поверхности, позволяет не учитывать изменение скорости тела во время удара. Однако последнее допущение оказывается не совсем справедливым, если учесть, что сжимаемость разных частей тела может значительно различаться.

В работе [121] разработан метод, позволяющий прогнозировать избыточное давление и удельный

импульс приходящей взрывной волны, которые обеспечивают трансляцию тела человека с критическими скоростями. В данном случае тело человека в аэродинамическом смысле аналогично цилиндру с отношением длины к диаметру, равным от 4 до 7, и в положении стоя коэффициент аэродинамического сопротивления человека лежит между 1 и 1,3. При определении скорости трансляции человека под действием взрывной волны использовали среднее отношение длины к диаметру 5,5 и коэффициент аэродинамического сопротивления 1,3. Выбор значения 1,3 для коэффициента аэродинамического сопротивления объясняется стремлением получить для любого сочетания давления и импульса взрывной волны наибольшую скорость, которая возможна в указанном диапазоне коэффициентов сопротивления, что обеспечивает определенный запас прочности. При расчетах предполагалось, что средняя плотность человека приблизительно равна плотности воды. Расчеты проводились для тел с 4 различными массами: 5кг (грудной ребенок), 25кг (ребенок), 55кг (женщина), 70кг (мужчина). Было определено, что если плотность, скорость звука и атмосферное давление сохраняются постоянными, то скорость трансляции оказывается функцией избыточного давления и

отношения удельного импульса волны к массе тела человека в степени 1/3 [121].

На рисунке 59 показано при каких давлениях и приведенных импульсах достигаются скорости трансляции, отвечающие различным степеням тяжести травмы черепа на высоте уровня моря. На рисунке 60 показана диаграмма для оценки летальности при ударе тела на той же высоте.

Пример 11.

Третичное повреждение взрывной волной.

Рассмотрим следующую ситуацию: мужчина массой 75кг был поражен взрывной волной с избыточным давлением 70 кПа и длительностью 10 мс на высоте 0м над уровнем моря. Какова в этом случае вероятность третичного поражения при трансляции тела человека в результате травмы черепа либо повреждения других частей тела?

Вычисляя приведенный импульс:

$$\bar{i}_s = \frac{(7 \cdot 10^4) \cdot 10^{-2}}{75^{1/3}} = 166 \text{ Па} \cdot \text{с} / \text{кг}^{1/3},$$

найдем на рисунке 59 точку, отвечающую приведенному импульсу и избыточному давлению 70 кПа. Видно, что при высоте 0м травмы черепа не должно быть. Из рисунка 60 при тех же значениях давления и импульса найдем, что трансляция тела не должна причинять серьезной опасности.

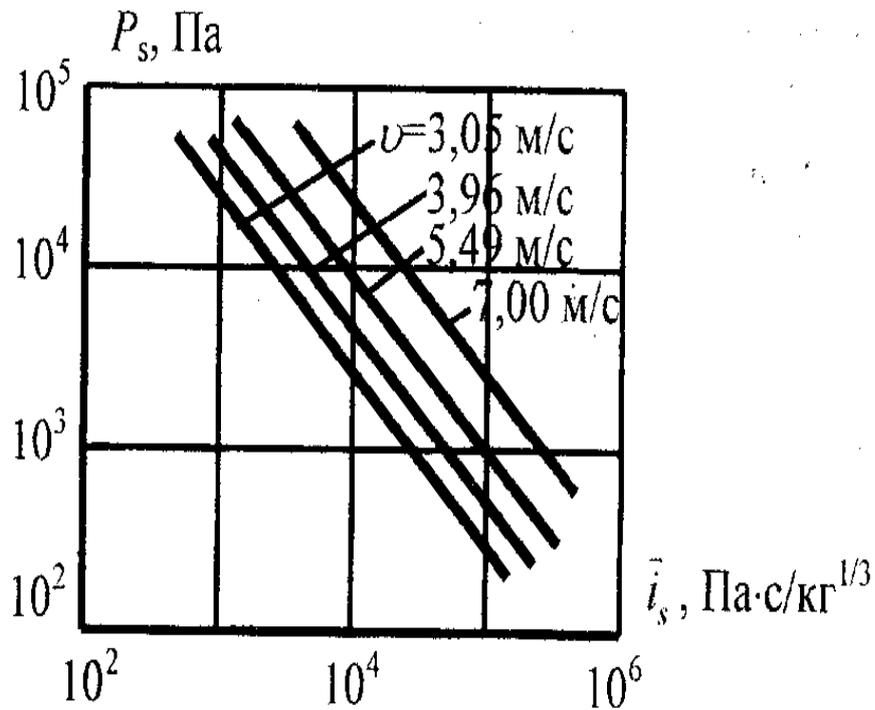


Рисунок 59. Диаграммы для оценки серьезности травм черепа при трансляции на высоте 0 м над уровнем моря

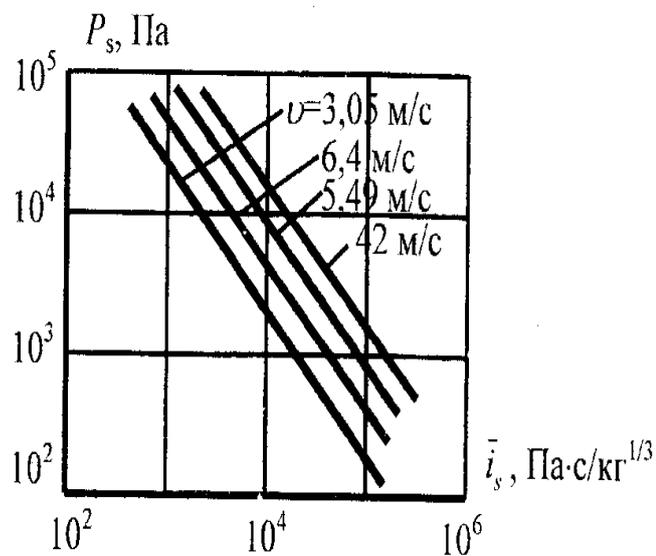
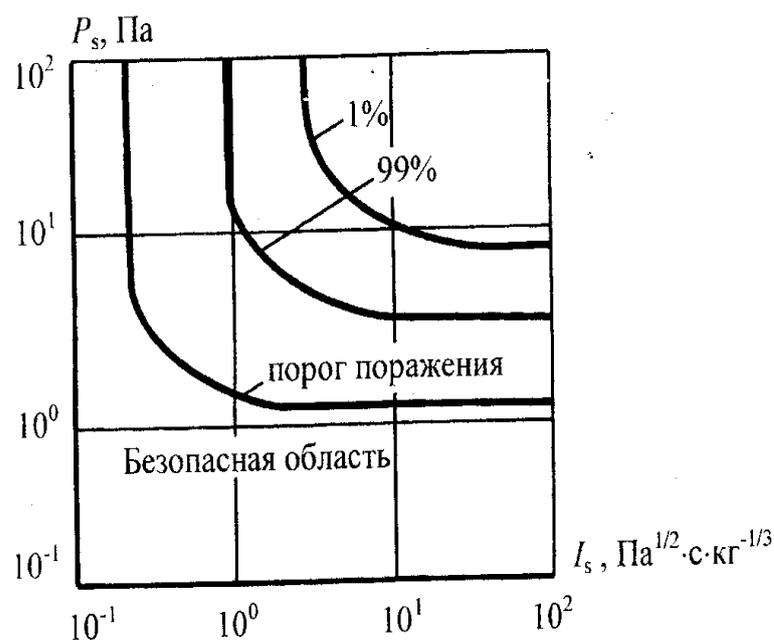


Рисунок 60. Диаграммы для оценки летальности при ударе тела во время трансляции на высоте 0 м над уровнем моря

Поражающее действие ударной волны на человека определяется давлением ΔP_ϕ и импульсом I . На рисунках 61-63 приведены графики функций риска поражения людей от однократного барического и метательного действия взрывной волны [140]. На рисунке 61 приведена диаграмма вероятности выживания λ открыто стоящего человека при поражении его органов дыхания (легких) в зависимости от параметров ударной волны - давления и импульса.



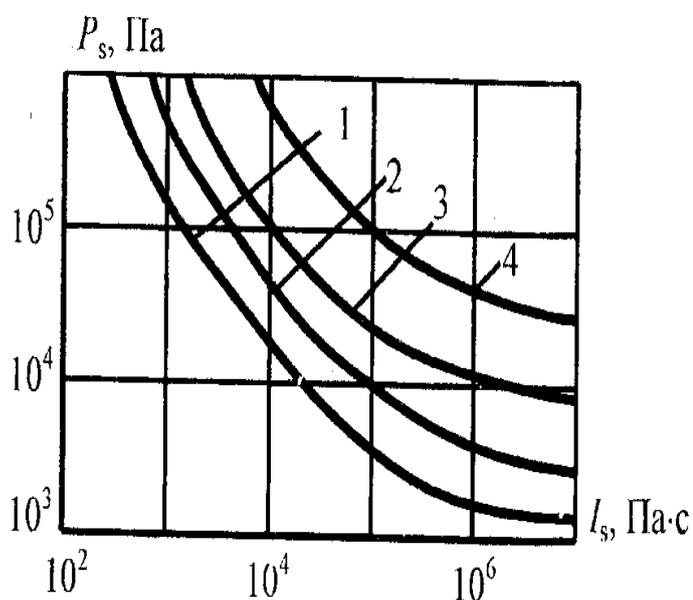
Рисунке 61. Вероятность выживания λ при поражении органов дыхания человека в зависимости от приведенных параметров ударной волны

На рисунке 61 по оси ординат отложено безразмерное давление P_s , а по оси абсцисс - приведенный импульс I_s .

$$P_s = \Delta P / P_0, I_s = 1 / (P_0^{1/2} \cdot m^{1/3}), \quad (161)$$

где $\Delta P = \Delta P_m + P_{ск}$; ΔP_m - амплитуда

избыточного давления взрывной волны, Па; P_0 – атмосферное давление, Па; I – удельный импульс, Па·с; $P_{ск}$ – максимум скоростного напора, Па; m – масса тела человека.



1 - скорость отброса тела человека 3 м/с (безопасность); 2 - 6,5 м/с (порог безопасности); 3 - 16,5 м/с (50% потерь); 4 - 42,0 м/с (100% потерь).

Рисунок 62. Диаграмма оценки поражения человека метательным действием взрыва

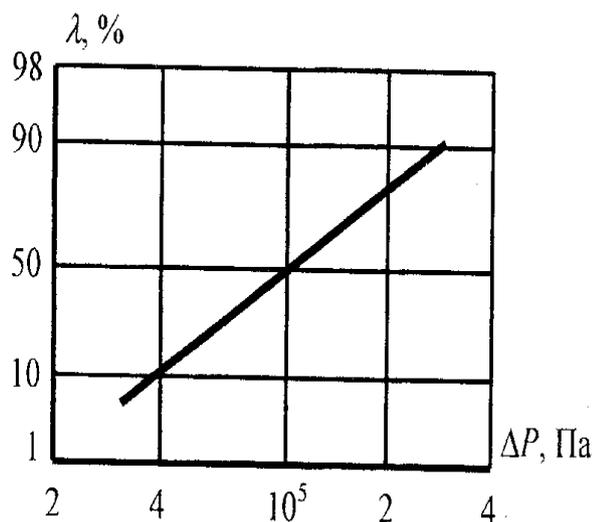


Рисунок 63. Вероятность λ разрыва барабанной перепонки человека в зависимости от давления в ударной волне

Асимптотические значения границ областей с различной вероятностью λ выживания человека следующие:

$P_s,$ кПа	0,9	3	5	6	7	8
$I,$ $\text{Па}^{1/2} \cdot \text{с} \cdot \text{кг}^{1/3}$	0,2	1,0	1,35	1,8	2,3	3,0
λ	1	0,99	0,9	0,5	0,1	0,01

Вероятность поражения G представляет дополнение λ до единицы:

$$G = I - \lambda. \quad (162)$$

Опасным для человека является избыточное давление $\Delta P_\phi > 6,9$ кПа. Травмы барабанных перепонки возможны при $\Delta P_\phi > 35$ кПа.

Рассмотрим энергетический подход к оценке риска поражения людей. Интерпретируя результаты

опытов с животными (морские свинки, кролики) на травматологию человека при взрывах зарядов конденсированных ВВ небольшой массы, в работе [7] установлены следующие значения избыточного давления ΔP_{ϕ} , вызывающего поражения различной степени (таблица 37).

В работе [7] также установлено, что граница опасной зоны зависит от давления ΔP_{ϕ} , кгс/см², и длительности фазы сжатия τ_+ , мс, согласно условию:

$$\Delta P_{\phi}^2 \cdot \tau_+ \geq G_2,$$

тогда как нижняя граница летального действия ударной волны зависит также от удельного импульса I , кгс·мс/см²

$$\Delta P_{\phi}^2 \cdot \tau_+ \geq G_1, I^2 \cdot \tau_+ \geq T_1.$$

Критические параметры в этих формулах имеют значения: $G_2 = 20 \text{ (кгс/см}^2\text{)}^2 \cdot \text{мс}$, $G_1 = 210 \text{ (кгс/см}^2\text{)}^2 \cdot \text{мс}$, $T_1 = 380 \text{ (кгс/см}^2\text{)}^2 \cdot \text{мс}^3$ (в системе СИ $G_2 = 2 \cdot 10^8 \text{ Па}^2 \cdot \text{с}$, $G_1 = 2,1 \cdot 10^9 \text{ Па}^2 \cdot \text{с}$).

Таблица 37

Давления ударной волны, вызывающие поражения человека различной степени

ΔP_{ϕ} , кПа	Результат воздействия
1	2
20	Разрывы барабанных перепонок. Небольшие кровоизлияния в легкие (поражение 1-й степени)
50	Кроме указанного выше, общее сотрясение организма, болезненный удар по голове, кровоизлияние в легкие, межмышечное кровоизлияние, гиперемия мозга, иногда перелом ребер (поражение 2-й степени)

продолжение таблицы 37

1	2
70	Давление, трудно переносимое организмом, вызывающее состояние контузии (поражение 3-й степени)
100-150	Переломы ребер, гиперемия сосудов мягкой мозговой оболочки
300	Летальный смертельный исход

Приведенные данные относятся к коротким волновым нагрузкам (взрывным импульсам), соответствующим зарядам ВВ примерно до нескольких сотен килограмм. Для ударно-волновых нагрузок большей длительности значения G_1 , G_2 , T_1 будут иными, либо поражающее действие будет определяться только давлением.

10.5 Аппроксимация законов поражения людей и повреждений объектов в зоне действия взрыва

Для оценки вероятности поражения людей и повреждений объектов рассмотрим методику оценки риска поражения с применением аппроксимации функции G . Поскольку результат воздействия определяется совместным влиянием большого числа параметров и случайных факторов риска, оценка последствий возможна на основе вероятностного подхода. Далее предполагается, что вероятность поражения G распределена нормально с некоторым средним значением μ и дисперсией σ^2 .

Параметры μ и σ теоретического распределения уточняются по статистическим данным. Кроме того, при выборе закона распределения и наличии достаточной статистической информации оценивают степень согласованности теоретического и статистического распределений с использованием одного из критериев, например, критерия Колмогорова.

Как известно, дискретные значения случайной величины группируются около μ , причем стандарт σ пропорционален разбросу. В зонах, где поражение зависит от одного из параметров, т.е. только от давления или только импульса, закон поражения может быть аппроксимирован одномерной нормальной функцией плотности распределения случайной величины.

Предположим, что в зоне определенного влияния импульса на основании опытных данных известно минимальное значение импульса $I=I_1$, вызывающего безусловное (100%) поражение, и наибольшее безопасное значение, т.е. вероятность поражения $G=I$ при $I > I_1$, и $G = 0$ при $I > I_2$. Тогда для вероятности поражения $G(I)$ с I в интервале $I_2 \leq I \leq I_1$ можно принять приближенные значения математического ожидания μ и стандарта σ нормально распределенной случайной величины $G(I)$:

$$\mu = (I_1 + I_2)/2,3 \cdot \sigma = (I_1 - I_2)/2; \quad (163)$$

$$G(I) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^z \exp\left(-\frac{1}{2}u^2\right) \cdot du, \quad (164)$$

где $z = (1 - \mu)/\sigma$.

Значения интеграла табулированы [142], но могут быть подсчитаны по формулам разложения:

$$G(I) = \frac{1}{2}\Phi(x) + \frac{1}{2}; x = z/\sqrt{2}; \quad (165)$$

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(x - \frac{x^3}{3} + \frac{1}{2!} \cdot \frac{x^5}{5} - \frac{1}{3!} \cdot \frac{x^7}{7} + \frac{1}{4!} \cdot \frac{x^9}{9} \dots \right). \quad (166)$$

Эти формулы следует ограничить диапазоном $I_2 < I < I_1$. Соответствующие граничные условия значения аргумента $z = \pm 3$ и вероятностей $G(-3) = 0,0014$ и $G(3) = 0,9986$. По мере приближения импульса I к граничным условиям сходимость ряда ухудшается, т.е. для нахождения $\Phi(x)$ с высокой точностью требуется большое число членов ряда. Например, при $z = -2,7$, $x = -1,91$ для получения результата с ошибкой не более 0,001% требуется суммирование 17 членов ряда.

Пример 12.

Проведем расчет вероятности G поражения людей в зоне с давлением $P_s \geq 20$. Граничные значения импульса $(I_s)_1 = 2,0$; $(I_s)_2 = 0,2$. Принимая $P_0 = 10^5$ Па, $m = 65$ кг, подсчитаем по формулам:

$$I_1 = (I_s)_1 \sqrt{P_0} \cdot \sqrt[3]{m} = 2 \cdot \sqrt{10^5} \cdot \sqrt[3]{65} = 2,54 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$I_2 = 2,54 \cdot 10^2 \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$\mu = (2,54 \cdot 10^3 + 0,254 \cdot 10^2)/2 = 1,4 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

$$\sigma = (2,54 \cdot 10^3 - 0,254 \cdot 10^2)/6 = 0,381 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Пусть на некотором расстоянии от взрыва получено расчетное значение импульса, например, $I=1,3 \cdot 10^3$ Па·с. Тогда z находится в диапазоне $-3 < x < 3$:

$$z = (I - \mu)/\sigma = (1,3 - 1,4)/0,381 = -0,262$$

и по таблице нормальной функции распределения для $z=-0.26$ находим $G=0,397$.

Величину G можно определить по формуле $G(z)=1-G(-z)$, если пользоваться таблицей нормальной функции распределения с положительными значениями z .

Проводя расчет данного примера по формуле (132) с пятью членами ряда, получим тот же самый результат:

$$x = z/\sqrt{2} = -0,262/\sqrt{2} = -0,185;$$

$$\Phi(x) = \frac{2}{\pi} \cdot \left(-0,185 + \frac{0,185^3}{3} - \frac{1,185^5}{10} + \frac{0,185^7}{42} - \frac{0,185^9}{216} \right) = -0,206;$$

$$G(I) = \frac{1}{2} \cdot \Phi(x) + \frac{1}{2} = 0,5 \cdot (-0,206) + 0,5 = 0,397.$$

Аналогичная методика может быть использована для оценки риска поражения в области определяющего влияния давлений, а координатные законы поражения можно установить переходом от давлений и импульсов к соответствующим радиусам.

Действие взрыва характеризуется рядом поражающих факторов. Однако эффективность каждого из этих факторов оценивают несколькими параметрами. Например, поражающее действие ударной волны определяется давлением и импульсом.

Рассмотрим сначала методику расчета по одному

фактору с двумя параметрами, а именно - по ударной волне взрыва бризантного ВВ или облака ГПВС [140].

Чтобы охватить диапазон совместного влияния двух параметров поражающего фактора, закон поражения от механического действия взрыва должен включать две случайные величины - давление P и импульс I . Совокупная характеристика S двух-параметрического воздействия, выступающая в качестве аргумента в распределении (130) и соответствующая данным на рисунках 46, 61, 62, имеет вид:

$$z = -d \cdot \ln S, S = S(P, I). \quad (167)$$

Для аппроксимации закона поражения человека в результате травм дыхательной системы легких функция S такова:

$$S = \alpha / P_s + b / I_s,$$

а вследствие метательного действия взрывной волны:

$$S = \alpha / \Delta P_m + b / (\Delta P_m \cdot I).$$

Для оценки вероятности повреждений и разрушений зданий используют формулу с большим числом параметров:

$$S = (a / \Delta P_m)^{K_1} + (b / I)^{K_2}.$$

Приведенные выше соотношения для S могут быть обобщены следующим выражением:

$$S = (A/C)^{K_1} + (B/D)^{K_2} \quad (168)$$

с коэффициентами по таблице 35, в которой приняты размерности величин ΔP_m , Па; I , Па·с, а значения P_s и I_s , Па^{1/2}·с/кг^{1/3}, берутся по формулам (127).

Таблица 38
Коэффициенты в формуле для S

Объект	Фактор	A	B	C	D	K ₁	K ₂	D
Люди	Баротравма	4,2	1,3	P _s	I _s	1	1	5,74
	Метание	7,38·10 ³	1,3·10 ⁹	ΔP _m	I·ΔP _m	1	1	2,44
Здания	Повреждения	1,75·10 ⁴	2,9·10 ²	ΔP _m	I	8,4	9,3	0,26
	Разрушение	4,00·10 ⁴	4,6·10 ²	ΔP _m	I	7,4	11,3	0,22

Пример 13.

Оценим вероятность поражения людей на расстоянии R = 100м от заряда ВВ массой C = 10⁴кг. Подсчитаем давление ΔP_ф, удельный импульс I и скоростной напор P_{ск} по формулам (98-100):

$$\bar{R} = 100 / \sqrt[3]{10^4} = 4,64 \text{ м} \cdot \text{кг}^{1/3}$$

$$\Delta P_{\phi} = \frac{0,84}{4,64} + \frac{0,27}{4,64^2} + \frac{0,7}{4,64^3} = 0,0376 \text{ МПа} = 0,376 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$\Delta P_{\phi}' = 0,376 \cdot 10^5 / 10^5 = 0,376$$

$$P_{\text{ск}} = 2,5 \cdot 0,376 \cdot 10^5 \cdot 0,376 / (0,376 + 7) = 0,0479 \cdot 10^5 \text{ П}$$

$$I = 0,4 \cdot (10^4)^{2/3} / 100 = 1,857 \text{ кПа} \cdot \text{с} = 1,857 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Для проверки на баротравму возьмем данные из таблицы 36: A=4,2; B=1,3; C=I_s; K₁=K₂=I; d=5,74.

Подсчитаем P_s, I_s:

$$P_s = (0,376 + 0,0479) / 1 = 0,424;$$

$$I_s = 1,847 \cdot 10^3 / (\sqrt{10^5} \cdot \sqrt[3]{65}) = 1,46 \text{ Па}^{1/2} \cdot \text{с} \cdot \text{кг}^{-1/3}$$

По формулам (134) и (133)

$$S = (4,2 / 0,424)^1 + (1,3 / 1,46)^1 = 10,8;$$

$$Z = -d \cdot \ln S = -5,74 \cdot \ln 10,8 = 13,6.$$

Поскольку z < -3 вероятность поражения мала G < 0,0014, в дальнейших вычислениях нет необходимости.

Так как параметры взрывного воздействия (давление и импульс) являются функциями массы и радиуса R , в интервале $-3 < z < 3$ как следствие сильной градиентности давлений и импульсов при взрывах бризантных ВВ.

В более общем случае оценку вероятности поражения проводят с учетом совместного действия более двух поражающих факторов. Так, для подсчета риска поражения человека взрывом бризантного ВВ необходимо учитывать барическое, метательное и осколочное действие, а при дефлаграционных взрывах облаков ГПВС – также действие тепловой радиации.

Вероятность поражения от совместного, незави-симого, т.е. без накопления ущерба, воздействия и поражающих факторов одиночного взрыва определяется по формуле:

$$G = 1 - G = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - G_i), \quad (I69)$$

где G_i - вероятность поражения от действия i -го фактора.

Пример 14.

Проведем расчет вероятности поражения человека от совместного барического и метательного действия взрыва заряда ВВ с массой $C = 10^4$ кг на радиусе $R = 37$ м. Параметры ударной волны следующие (98-100): $\Delta P_{\Phi} = 2,787 \cdot 10^5$ Па; $P_{ск} = 1,984 \cdot 10^5$ Па; $I = 5,018 \cdot 10^3$ Па·с. По формулам (127) при $P_m = \Delta P_{\Phi}$:

$$P_s = (2,787 \cdot 10^5 + 1,984 \cdot 10^5) / 10^5 = 4,77;$$

$$I_s = 5,018 \cdot 10^3 / (\sqrt{10^5} \cdot \sqrt[3]{65}) = 3,947 \text{ Па}^{1/2} \cdot \text{с} \cdot \text{кг}^{-1/3}.$$

Для барического действия введем индекс $i = 1$. Из таблицы 36 запишем:

$A = 4,2; B = 1,3; C = 4,77; D = 3,947; d = 5,74;$
 $K_1 = K_2 = 1$ и по формулам (135), (134), (133), (132):
 $S_1 = 4,2/4,77 + 1,3/3,947 = 1,21; z = -5,74 \cdot \ln 1,21 = -$
 $1,094;$

$$x = 1,094 / \sqrt{2} = -0,773; \phi(x) = -0,726;$$

$$G_1 = 0,5 \cdot 0,726 + 0,5 = 0,137$$

Для оценки поражения от метательного действия введем $i=2$ и по таблице 36: $A=7,38; B=1,3 \cdot 109;$
 $C = \Delta P_{\phi} = 2,787 \cdot 10^5 \text{ Па}; D = I \cdot \Delta P_{\phi} = 5,018 \cdot 10^3 \cdot 2,787 \cdot 10^5$
 $= 1,400 \cdot 10^8 \text{ Па} \cdot \text{с}; d = 2,44; K_1 = K_2 = 1.$ По указанным выше формулам получим: $S_2 = 0,956; z = 0,109; x = -$
 $0,077; \Phi(x) = 0,087; G_2 = 0,543.$

Сравнение результатов показывает, что вероятность поражения отбросом G_2 значительно больше, чем от барического действия ударной волны G_1 . Вероятность поражения человека от совместного (барического и метательного) действия согласно формуле (135) равна:

$$G = 1 - (1 - 0,137) \cdot (1 - 0,543) = 0,606.$$

Вероятность поражения в переходной зоне в диапазоне значений $-3 < z < +3$ ограничена радиусами примерно от 30 до 50 м:

R, m	30	35	37	40	45	50	55
G_1	0,96 6	0,37 8	0,13 7	0,01 4	0	0	0
G_2	0,96 6	0,71 1	0,54 3	0,30 4	0,0 7	0,01	$1,51 \cdot 10^{-3}$
G	0,999	0,821	0,606	0,314	0,07	0,01	$1,51 \cdot 10^{-3}$

Рассмотрим еще один альтернативный подход по

оценке поражающего действия ударной волны. При взрывах ГПВС существенную роль играет такой поражающий фактор, как длительность действия ударной волны и связанный с ней параметр - импульс взрыва. Реальное деление плоскости факторов поражения на диаграмме импульс-давление на две части (внутри - область разрушения, вне - область устойчивости) не имеет четкой границы. При приближении параметров волны к границе опасной области вероятность заданного уровня поражения нарастает от 0% до 100%. При превышении известного уровня величин амплитуды давления и импульса достигается 100% вероятность поражения. Эта типичная особенность диаграмм поражения может быть отражена представлением вероятности достижения того или иного уровня ущерба с помощью функции R_{pi} . При расчете функции R_{pi} давление и импульс измеряются соответственно в Па и Па·с.

Вероятность повреждений стен промышленных зданий, при которых возможно восстановление зданий без их сноса, может оцениваться по соотношению:

$$R_{pi1} = 5 - 0,26 \cdot \ln U_1, \quad (170)$$

где фактор U_1 , рассчитывается с учетом перепада давления в волне и импульса статического давления

по соотношению:

$$Y_1 = (17500/\Delta P)^{8,4} + (290/1)^{9,3}. \quad (171)$$

Вероятность разрушений промышленных зданий, при которых здания подлежат сносу, оценивается по соотношению:

$$R_{п2} = 5 - 0,22 \cdot \ln Y_2. \quad (172)$$

В этом случае фактор Y_2 определяется:

$$Y_3 = (40000/P)^{7,4} + (460/1)^{11,3}. \quad (173)$$

Далее приводятся соотношения, которые могут быть использованы для расчета уровня вероятности поражения воздушной волной живых организмов (в том числе и человека).

Вероятность длительной потери управляемости у людей, попавших в зону действия ударной волны при взрыве облака ГПВС, может быть оценена по величине функции:

$$R_{п3} = 5 - 5,74 \cdot \ln Y_3. \quad (174)$$

Фактор опасности Y_3 рассчитывается по соотношению:

$$Y = 4,2/p^* + 1,3/i^*, \quad (175)$$

где безразмерные интенсивность волны (безразмерное давление и безразмерный импульс) определяются:

$$p^* = 1 + \Delta P/P_0, \quad i^* = I/(P_0^{1/3} \cdot m^{1/3}). \quad (176)$$

Вероятность разрыва барабанных перепонок у

людей от перепада давления в воздушной волне определяется:

$$R_{п4} = -12,6 + 1,524 \cdot \ln \Delta P . \quad (177)$$

Вероятность отброса людей волной давления может определяться:

$$R_{п5} = 5 - 2,44 \cdot \ln Y_5 . \quad (178)$$

Здесь фактор Y_5 рассчитывается по соотношению:

$$Y_5 = 7,38 \cdot 10^3 / \Delta P + 1,3 - 10^9 / (\Delta P \cdot I) . \quad (179)$$

Связь функции $R_{пi}$ с вероятностью той или иной степени поражения находится из таблицы 39.

Таблица 39

Связь вероятности поражения P с функцией $R_{пi}$

$P, \%$	1	2	5	7	9
1	2	3	4	5	6
0	2,67	3,12	3,38	3,52	3,66
10	3,77	3,81	3,96	4,05	4,12
20	4,19	4,26	4,33	4,39	4,45
30	4,50	4,56	4,61	4,67	4,72
40	4,77	4,82	4,87	4,92	4,97
50	5,03	5,08	5,13	5,18	5,23
60	5,28	5,33	5,39	5,44	5,50
70	5,55	5,61	5,67	5,74	5,81
80	5,88	5,95	6,04	6,13	6,23
90	6,34	6,48	6,64	6,88	7,33
100	7,37	7,46	7,58	7,75	8,09

Пример 15.

В результате аварии на автодороге, проходящей

по открытой местности, в безветренную погоду произошел разрыв автоцистерны, содержащей 8т сжиженного газа пропана. В результате испарения разлившегося газа в пределах воспламенения оказалось практически все топливо, перевозившееся в цистерне. Средняя концентрация пропана в образовавшемся облаке составила около 140 г/м. Расчетный объем облака составил 57 тыс. м³ Воспламенение облака привело к возникновению взрывного режима его превращения. Требуется определить параметры воздушной ударной волны (избыточное давление и импульс фазы сжатия) на расстоянии 100м от места аварии.

Сформируем исходные данные для расчетов:

- тип топлива - пропан;
- агрегатное состояние смеси - газовая;
- концентрация горючего в смеси- $C_z=0,14$ кг/м³;
- масса топлива, содержащегося в облаке – M_z - 8000кг;
- удельная теплота сгорания топлива - $q_z = 46,4$ МДж/кг
- окружающее пространство - открытое (вид 4).

Определяем эффективный энергозапас горючей смеси E , так как $C_z > C_{ст}$, и, следовательно:

$$E=2 \cdot M_z \cdot q_z \cdot C_{ст} C_z=2 \cdot 8000 \cdot 46,4 \cdot 0,077/0,14=4,1 \cdot 10^5 \text{ МДж.}$$

Исходя из классификации веществ определяем,

что пропан относится ко второму классу опасности. Геометрические характеристики окружающего прост-ранства относятся к виду 4 (открытое пространство). По экспертной таблице 26 определяем ожидаемый режим взрывного превращения облака ГПВС - дефлаграция с диапазоном видимой скорости фронта пламени от 150 до 200 м/с. Для проверки рассчитываем скорость фронта пламени по соотношению (90):

$$V_z = K_1 \cdot M^{1/6} = 43 \cdot 8000^{1/6} = 192 \text{ м/с.}$$

Полученная величина меньше максимальной скорости диапазона данного взрывного превращения.

Для заданного расстояния $R=100$ м, рассчитаем безразмерный радиус R_x :

$$R_x = R / (10 E/P_0)^{1/3} = 100 / (10 \cdot 4,1 \cdot 10^5 / 1)^{1/3} = 0,63.$$

Рассчитаем параметры взрыва при скорости горения 200 м/с. Для вычисленного безразмерного расстояния определим величины P_{x1} и I_{x1} :

$$P_{x1} = (V_z/C_0^2) \cdot ((\sigma-1)/\sigma) \cdot (0,83/R_x - 0,14/R_x^2) = 200^2/340^2 \cdot 6/7 \cdot (0,83/0,63 - 0,14/0,63^2) = 0,29;$$

$$I_{x1} = (V/C_0) \cdot ((\sigma-1)/\sigma) \cdot (1 - 0,4(V/C_0)(\sigma-1)/\sigma) \cdot (0,06/R_x + 0,01/R_x^2 - 0,0025/R_x^3) = (200/340) \cdot ((7-1)/7) \cdot (1 - 0,4(200/340)(7-1/7)) \cdot (0,06/0,63 + 0,01/0,63^2 - 0,0025/0,63^3) = 0,0427.$$

Так как ГПВС - газовая, то величины P_{x2} и I_{x2} рассчитываем по формулам:

$$P_{x2} = \exp(1,124 - 1,66 \cdot \ln(R_x) + 0,26(\ln(R_x))^2) = 0,74 ;$$

$$I_{x2} = \exp(- 3,4217 - 0,898 \cdot \ln(R_x) - 0,0096 (\ln(R_x))^2) = 0,049 .$$

Определяем окончательно P_x и I_x :

$$P_x = \min(P_{x1}, P_{x2}) = \min(0,29 ; 0,74) = 0,29;$$

$$I_x = \min(I_{x1}, I_{x2}) = \min(0,0427; 0,049) = 0,0427.$$

Из найденных величин P_x и I_x вычисляем искомые величины избыточного давления и импульса фазы сжатия в воздушной ударной волне на расстоянии 100м от места аварии при скорости горения 200 м/с:

$$P = 0,28 \text{ атм}; I = 100 \cdot I_x (0,1 \cdot P_0)^{2/3} \cdot E^{1/3} / C_0 = 0,2 \text{ атм} \cdot \text{с}.$$

Используя полученные значения ΔP и I , находим:

$R_{п1} = 6,06$; $R_{п2} = 4,47$; $R_{п3} = -1,93$; $R_{п4} = 3,06$; $R_{п5} = 2,78$, что согласно таблице 37 означает вероятности: 86% повреждений и 30% разрушений промышленных зданий, а также с вероятностью 2,5% вероятен разрыв барабанных перепонок у людей и 1% вероятности отброса людей волной давления. Вероятности остальных критериев поражения близки к нулю.

ЛИТЕРАТУРА

1. Раев-Богословский Б.С., Глушков Г.И., Ткаченко А.С. и др. Жесткие покрытия аэродромов - М.: Автотрансиздат, 1961. - 345 с.

2. Цытович Н.А. Механика грунтов - М.: Стройиздат, 1983. - 426 с.

3. Рахматулин Х.А. О распределении волн разгрузки // Прикладная математика и механика. - Т. IX. - Вып. I. - 1945. - 345 с.

4. Давыдов С.С. Колебания разнородного грунта в упругопластической стадии от кратковременной нагрузки // Доклады к международному конгрессу по механике грунтов и фундаментостроению. - М.: Госстройиздат, 1961. - 245 с.

5. Григорян С.С. Об основных представлениях динамики грунтов // Прикладная математика и механика. - Т. XXIV. - Вып. 6. - 1966. - С. 24-48.

6. Ляхов Г.М. Определение вязких свойств грунтов // Прикладная механика и техническая физика - 1968. - № 4. - С. 18-26.

7. Покровский Г.И. Взрыв - М.: Недра, 1973. - 156 с.

8. Маслов Н.Н., Филимонов Н.А. Условия устойчивости водонасыщенных песков - М.: Госэнергоиздат, 1959. - 168 с.

9. Liman A.K. B. Compaction of Cohesionless Foundation Soils by Explosives // Trans. ASGE. - V. 107. - Paper № 2160. – 1942. - P. 1330-1345.

10. Флорин В. А. Явления разжижения и способы уплотнения рыхлых водонасыщенных оснований // Известия АН СССР, О.Т.Н. - 1952. - №6.- С. 824-833.

11. Флорин В.А. Основы механики грунтов - М.: Стройиздат, 1959. - 326 с.

12. Иванов П.Л., Шульц Л.В. Влияние формы частиц на свойства песков намывных сооружений // Гидротехническое строительство. -1972.-№11- С.47-49.

13. Иванов П.Л. К теории консолидации несвязных водонасыщенных грунтов при динамических воздействиях // Труды координационных совещаний по гидротехнике. - Вып. 80. –Энергия. - 1973.- С.84-90.

14. Иванов П.Л. Разжижение песчаных грунтов – М.: Госэнергоиздат, 1962.-136с.

15. Миц И.С. К вопросу о плотности песка при подводном намыве // В кн.: Вопросы геотехники. - Вып.3. – Днепропетровск: Днепропетровское кн. изд-во, 1959.- С.261-274.

16. Prugh B.I. Densification of Soils by Explosive Vibrations // Proc. of ASGE.- V.89/ - March. - № 001.- 1963 - P.79-100.

17. Hall C.E. Compacting a Dam Foundation Blasting // Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division.- V.88. - № SM3.- Proc. Paper 316. - June. -1962. - P.79-100.

18. Blasting Compacts Sand Fill // Construction Methods and Equipment.-May. - V.42. - № 5.- 1960. - P.125-131.

19. Klohn E. J., Gandas V.K. Densification of Sano Tailing by Blasting // Proc. of the X Intern. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng. -V.3.- Stockholm.-1981. - P. 725-730.

20. Florin V.A., Ivanov P.L. Liquefaction of Saturated Sandy Soils // Proc. of the V Intern. Conf. on Soils Mech. and Found. Eng. - V.1. Paris, - 1961. - P. 182-186.

21. Ivanov P.L. Compaction of Cohesionless Soils by Explosives // Proc. of the VI Intern. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng. - V.111.- Monreal.-1965. - P.352-354.

22. Ivanov P.L., Krasnikov N.D. Charge Explosion Sounding of Saturated Cohesionless Soil // VI Simp. on Earhquake Eng., University of Roorhee. - V.1.-1978.- P. 151-156.

23. Ivanov P.L. Consolidation of Saturated Soils by Explosions // Intern. Conf. on Compaction.- V.1. - Paris. - 1980.- P. 331-337.

24. Иванов П.Л., Трунков Г.Т., Островский В.И., Раснецов Л.С. Уплотнение каменной постели и основания мола нефтегавани подводными взрывами // Транспортное строительство.-1965. - № 6.- С.20-22.

25. Аскарлов А.Х., Ядгеров З.Х. Уплотнение лессовых просадочных грунтов способом подводного взрыва // Строительство и архитектура Узбекистана. -1967.- №5.- С. 14-19.

26. Dembichi E., Kisielova N., Nowakowski H. Compaction of Sandy Marine Subsoils by Means of Blasting // Intern. Conf. on Compaction.- V.1.-Paris. - 1980. - P.301-305.

27. Dembichi E., Kisielova N., Nowakowski H. Dynamic Consolidation of Mud Soil by Means of Blasting Changes // Intern. Conf. on Compaction.-V.1. – Paris. -1980. - P.295-299.

28. Pilot G. Colas des Frames E., Quegroi D. Compactage par Explosiv d' Remblai Hydraligul // Proc. of the X Intern. Conf. on Soil Mech. And Found. Eng. - V.3.- Stockholm. - 1981. - P.757-760.

29. Иванов П.Л. Уплотнение несвязных грунтов взрывами - М.: Стройиздат, 1967. - 176 с.

30. Иванов П.Л.. Грунты и основания гидротехнических сооружений - М.: Высшая школа, 1985. - 352 с.

31. Иванов П.Л. Разжижение и уплотнение

несвязных грунтов при динамических воздействиях - Л.: ЛПИ, 1978. – 52 с.

32. Кузнецов В.Л., Лавриненко В.Л., Абашкин Ю.В. Стабилизация золо-шлаковых отложений буровзрывным методом // Энергетическое строительство. -1982. - №1.- С.32-35.

33. Simon A. Comparaison de l'efficacite de trois proce'de's de compactage l'paisseur sur un remblai hydraulique // Colloque Intern. sur Compacrage.-V.1.- Paris. - 1980.- P.363-368.

34. Кузовлев А.Г. Исследование уплотнения просадочных песчаных грунтов взрывами // Вопросы строительства гидротехнических сооружений на просадочных грунтах - Баку. - 1969. - С.6-11.

35. Кушнарев Д.М. Использование энергии взрыва в строительстве – М.: Стройиздат,1973.- 288с.

36. Багдасаров Ю.А. Комбинированный способ уплотнения просадочных грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1994. - №1. – С. 19-21.

37. Ананьев И.В., Воляник Н.В. Уплотнение лессовых грунтов. - Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского университета, 1989. - 124 с.

38. Евгеньев И.Е., Хусаинов И.Д. О влиянии микроструктуры глинистого грунта на изменение его свойств при уплотнении // Закрепление и уплотнение

грунтов в строительстве: Тез.докл. на X Всес.науч.-техн. совещ. – Ростов-на-Дону. – 1983. – С.141-142.

39. Абелев М.Ю., Цой А.В., Мынтыбаев Т.Д. Экспериментальные исследования уплотнения лессовых грунтов в сейсмических районах // Основания, фундаменты и механика грунтов. - 1994. - №6. - С.913-914.

40. Банник Г.И. Основы технической мелиорации грунтов – Киев: Вища школа, 1972. - 272 с.

41. Васильева А.А. О прочностных свойствах уплотненных суглинков нарушенного сложения // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1986. - №3. – С.26-27.

42. Григорян А.А. О строительстве на лессовых грунтах // Основания, фундаменты и механика грунтов. - 1991. - №1. - С.24-26.

43. Лукутин И.Н. Влияние длительности вибрирования и влажности на уплотняемость каракумских песков // Водохозяйственные исследования в Туркменистане. - Ашхабад: Ылым. - 1977. - С.26-29.

44. Кранец В.Г. Динамика уплотнения грунтового массива взрывом – Киев: Наукова думка, 1979. – 133 с.

45. Литвинов И.М. Укрепление и уплотнение просадочных грунтов в жилищном и промышленном строительстве - Киев: Будивельник, 1977.-224 с.

46. Литвинов И.М., Кундрюцкий Ю.И. Уплотнение просадочных грунтов замачиванием и глубинными взрывами // Основания и фундаменты. - Вып. 10. - Киев: Будивельник, 1976. - С.56-59.

47. Donchef P. Compaction of Loess by Saturation

and Explosion// Intern. Conf. on Compaction. - V.1. - Paris. - 1980.- P.313-317.

48. Тахиров И.Г. Современные методы уплотнения и закрепления лессовых просадочных и водонасыщенных грунтов в Таджикистане // Душанбе: Изд. Госплана Тадж. ССР,1979. - 165с.

49. Мусаэлян А.А., Вильфенд А.Г. Применение энергии взрывов для уплотнения просадочных грунтов в Таджикистане // Материалы VIII Всесоюзного совещания «Закрепление и уплотнение грунтов в строительстве». - Киев.- 1974.- С.322-324.

50. Мусаэлян А.А. Вильфенд А.Г. Из опыта работ по уплотнению просадочных грунтов глубинными и подводными взрывами // Строительство и архитектура Узбекистана. - 1978.- №2 - С.11-14.

51. Методика расчета взрывных параметров для сооружения каналов и траншей на болотах // М.: ВНИИ строительства магистральных трубопроводов. - 1970. -16 с.

52. Рекомендации по прокладке магистральных трубопроводов на болотах и каналах, образованных взрывом // ВНИИ строительства магистральных трубопроводов. - 1967. – 18 с.

53. Руководство по технологии и организации работ при строительстве каналов и водоприемников на болотах и заболоченных землях - Минск: Урожай, 1977. - 47 с.

54. Авдеев Ф.А., Барон В.Д., Блейман И.Л. Нормативный справочник по буровзрывным работам - М.: Недра,1977. – 432 с.

55. Авдеев Ф.А. Образование канала при помощи массовых взрывов на выброс на строительстве Аллареченского рудника // Взрывное дело. - 1966. - № 6.- С.76-80.

56. Ядгеров З.Х., Аскарлов А.Х., Урманова Г.Л. Улучшение строительных свойств лессовых просадочных грунтов методом подводного взрыва // В кн.: Закрепление и уплотнение грунтов в строительстве. - Киев: Будивельник, 1974. - С.367-370.

57. Литвинов И.М. Глубинное укрепление и уплотнение просадочных грунтов - Киев: Будивельник, 1969. - 184 с.

58. Акимов А.А., Клименко А.И. Физико-механические свойства лессовидных грунтов, уплотненных замачиванием и глубинными взрывами // В кн.: Закрепление и уплотнение грунтов в строительстве. - Киев: Будивельник, 1974. - С. 49-52.

59. Ляхов Г.М. Основы динамики взрыва в грунтах и жидких средах - М.: Наука, 1964. - 216 с.

60. Рекомендации по устройству грунтовых полушек из переработанного лесса и обратных засыпок котлованов при строительстве оросительных систем на просадочных грунтах - М.: Союзоргтехводстрой, 1973. - 3 с.

61. Рекомендации по проектированию и производству работ ускоренным уплотнением просадочных лессовых грунтов большой мощности предварительным замачиванием и глубинными взрывами - М.: НИИ строительных конструкций. - 1976. - 76 с.

62. Рекомендации по уплотнению грунтов методом подводного взрыва - М.: НИИ оснований и подземных сооружений, 1977. - 53 с.

63. Вовк Л.А., Черный Г.И., Кравей В.Г. Действие взрыва в грунтах - Киев: Наукова думка, 1974. - 208 с.

64. Кравец В.Г. Динамика уплотнения грунтового

- массива взрывом - Киев: Наукова думка, 1979. - 133 с.
65. Рахматулин Х.А., Сагомоян А.Л., Алексеев П.А. Вопросы динамики грунтов - М.: Изд-во Моск. ун-та, 1964. - 240 с.
66. Вовк А.А. Основы прикладной геодинамики взрыва - Киев: Наукова думка, 1976. - 273 с.
67. Смирнов А.Г. Исследования физико-механических вопросов ведения взрывных работ в водонасыщенных грунтах - Киев: Наукова думка, 1974. - 140с.
68. Ляхов Г.М. Основы динамики взрывных волн в грунтах и горных породах - М.: Недра, 1974. - 192с.
69. Бурштейн М.Ф., Покровский Г.И., Корнаков Г.И. Применение массовых взрывов в строительстве - М.: Недра, 1980. - 256 с.
70. Власов О.Е. Основы динамики взрыва - М.: Воен.- инж.акад, 1957.-350с.
71. Вовк А.А., Черный Г.И., Смирнов А.Г. Основы взрывной проходки подземных выработок - Киев : Наукова думка, 1966. - 236 с.
72. Григорян С.С., Ляхов Г.М., Мельников В.В. Взрывные волны в лессовидном грунте // Прикладная механика и техническая физика.- 1963. - №4. - С.35-39.
73. Зволинский Н.В. Плоские взрывные волны в упруго-пластической среде // Доклады АН СССР. - 1964. - № 1. - С.40-42.
74. Ишлинский А.Ю., Зволинский Н.В., Степаненко И.З. К динамике грунтовых масс // Доклады АН СССР. - 1964.- № 4. - С.729-733.
75. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Проблемы гидродинамики и их математические модели - М.: Наука, 1973.- 416с.
76. Родионов В.Н., Адушкин В.В., Костюченко

В.Н. и др. Механический эффект подземного взрыва - М: Недра,1971. - 122 с.

77. Полищук А.И. О пределах применимости теории линейно-деформируемой среды к расчету фундаментов на лессовых грунтах // Известия вузов. – Строительство и архитектура. - 1982. - №4. - С.21-25.

78. Адушкин В.В. О формировании ударной волны и разлете продуктов взрыва в воздухе // Журнал прикладной механики и технической физики. - 1963.- № 5.- С. 107-114.

79. Осипов В.И. Природа прочностных и деформационных свойств глинистых пород - М.: Изд-во МГУ, 1979. – 232 с.

80. Косте Ж., Санглера Г. Механика грунтов практический курс – М.: Стройиздат, 1981. – 455 с.

81. Корольков В.Н., Мухамедов У.С. Метод ускоренного уплотнения просадочных грунтов с применением струйной технологии // Основания, фундаменты и механика грунтов. - 1991. - №1. – С.15-16.

82. Крутов В.И. Выбор методов уплотнения просадочных и насыпных грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1992. - №2. – С. 5-8.

83. Кушнарев Д.М., Патрушев А.И. Новая поточная технология буровзрывных работ в мелиоративном и водохозяйственном строительстве - М.: Колос,1971. - 19 с.

84. Какенов К.С. Технико-экономическое обоснование применения буронабивных свай при уплотнении грунта газовзрывным воздействием // Вестник КЭУ. – 2011. - №4 (23). – С.21-23.

85. Патент РК № 2000/0921.1. Способ

возведения трубчатой буронабивной анкерной сваи // Какенов К.С., Плотников В.М., Беляев В.В. - Астана. - 2000.

86. Коул Р. Подводные взрывы - М.: Издательство иностранной литературы, 1960. - 243 с.

87. Яковлев Ю.С. Гидродинамика взрыва - М.: Судромгиз, 1961. - 156 с.

88. Иванов П.Л. Уплотнение малосвязных грунтов взрывами - М.: Недра, 1983. - 230 с.

89. Кругов В.И. Основания и фундаменты на лессовых и глинистых грунтах - Киев: Будивельник, 1986. - 132 с.

90. Новожилов В.В. Основы нелинейной теории упругости - М.-Л.: Гостехиздат, 1947. - 186 с.

91. Зарецкий Ю.К. Теория консолидации грунтов - М.: Наука, 1967. - 270 с.

92. Зарецкий Ю.К. Лекции по современной механике грунтов. - Ростов-на-Дону, 1989. - 608 с.

93. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций - М.: Наука, 1966. - 752 с.

94. Зарецкий Ю.К., Чумичев Б.Д. Скорости распространения продольных волн в грунтах при их деформировании под нагрузкой // Прикладная механика и техническая физика. - М.: АН СССР. - 1975. - № 2. - С. 156-160.

95. Гурвич И.И. К теории сферического излучателя сейсмических волн // Известия АН СССР. - Сер. физики Земли. - 1965. - №10. - С.45-56.

96. Reissner E. Stationary axial symmetrische durch eine schuttelnde Masse erregte Schwingungen eines homogenen elastischen Halbraumes // Ingenieur Archiv. - 1986. - 212 s.

97. Шехтер О.Я. Об учете инерционных свойств грунта при расчете вертикальных вынужденных

колебаний массивных фундаментов // Труды НИИ оснований и фундаментов. - Механика грунтов. - №30.- 1978.- С. 128-154.

98. Снитко Н.К. Статическое и динамическое давление в грунтах и расчет подпорных стенок - М.: Госстройиздат, 1963. - 296 с.

99. Справочник. Основания и фундаменты // Под.ред. Г.И. Швецова.- М.: Высшая школа,1991.- 383 с.

100. Савинов О.А. Современные конструкции фундаментов под машины и их расчет - Л.: Стройиздат,1979.- 200 с.

101. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей // 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Наука,1972. - 720 с.

102. Разоренов В.Ф., Яковлев А.В. Прогноз сжимаемости и просадочности лессовых грунтов по изменению показателей физических свойств // Республиканский межведомственный научно-технический сборник. - Вып. 2. - Киев: Будивельник,1981. - С.94 - 98.

103. Коломенский И.В. Общая методика инженерно-геологических изысканий - М.: Недра,1978. - 186 с.

104. Когарко С.М., Адушкин В.В. Исследование сферической детонации газовых смесей // ФГВ. - 1968. - С.24-28.

105. Действие ядерного оружия // Пер. с англ.: Под ред. П.С Дмитриева. - М.: Наука,1965. - 368 с.

106. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и математическая статистика - М.: Высшая школа, 1999. - 576 с.

107. Болотин В.И, Применение методов теории

вероятностей к теории надежности в расчетах сооружений - М.: Стройиздат, 1971. - 164 с.

108. Герцбах И.В., Корденский Х.Б. Модели отказов - М.: Советское радио, 1966. - 214 с.

109. Rabin B. Accidents in the factories // Chemical Engineering. - 1965.- №26. - P.96-102.

110. Maysey H.R. Reduction of pressure into apparatus during explosions gas and dust mixtures // Chemical and Process Engineering. - 1989. - №3. - P.26-32.

111. Starch dust blomed in New Jersey // Chemical Engineering. - 1967.- №8.- P. 92-96.

112. National Safety News -1971. - №9. - P.114-120.

113. Annual Report Japan Industrial Safety Association - Tokyo. - 1973. - 56 p.

114. Heinrich H.I., Kowall R. Beitrag zur Kenntnis des ablanis druckent - lasteter Stranlexplosionen bei Zundung durch turbulente Plamen // Staub- Reinhalt Zuft. - 1972.- №7 – S.68-73.

115. Бесчастнов В.М., Соколов В.М., Кац М.И. Аварии в химических производствах и меры их предупреждения - М.: Химия, 1976. - 162 с.

116. В.Маршал. Основные опасности химических производств - М.: Мир, 1989. - 326 с.

117. Нетлетон М. Детонация в газах - М.: Мир, 1989.- 342 с.

118. Андреев К.К., Беляев А.Ф. Теория взрывчатых веществ - М.: Оборонгиз, 1960. - 246 с.

119. Гельфанд Е.Е., Губин С.А., Михалкин В.Н. Расчет параметров ударных волн при детонации горючих газообразных смесей переменного состава// ФГВ. - 1985. - №3.- С.92-97.

120. Гельфанд Б.Е., Бартенев А.М., Дорофеев С.Е. и др. Методика оценки последствий аварийных

взрывов топливно-воздушных смесей - М.: НТЦ,1998.- 32 с.

121. Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П. и др. Взрывные явления. Оценка и последствия // Кн. 1, 2. - М.: Мир,1986. - 424 с.

122. Рид Д.В. Воздушная ударная волна при подземных взрывах // В кн.: Подводные и подземные взрывы. - М.: Мир,1974. - С. 196-285.

123. Мартемьянов А.И. Проектирование и строительство зданий и сооружений - М.: Стройиздат,1985.- 256 с.

124. Риски в современном мире: идентификация и защита // Материалы VIII Международных научных чтений Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности. - СПб.: Изд-во МАНЭБ, 2004. - 405с.

125. Харьковский В.С., Демин В.Ф., Демина Т.В. К вопросу определения статистических показателей спектра характеристик случайных процессов на основе травматизма // Материалы 2-ой Международной научно-практической конференции «Мировой научный потенциал - 2005». - Том 17. Технические науки. – Днепропетровск, 2005. - С.50-52.

126. Методическое руководство по оценке степени риска на магистральных нефтепроводах. Руководящий документ. - М.: Государственное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности» Госгортехнадзора России, 2000. - 95с.

127. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. - М.: Наука, 1965. -524с.

128. Мирский Г.Я. Аппаратурное определение характеристик случайных процессов. - М.-Л.: Энергия, 1967. - 432с.

129. Харьковский В.С., Плотников В.М., Акимбеков Н.Н. и др. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах по определению параметров травматизма и степени опасностей на объектах хозяйствования // *Materialy II międzynarodowej naukowej – praktycznej konferencji «Wykstawienie I nauka bez granic – 2005»* - Tom 15. *Matematyka - Przemysł: “Nauka I studia”*, 2005. - S. 28-33.

130. Харьковский В.С., Плотников В.М. Идентификация риска с целью определения затратных условий на страхование работников предприятия // *Материалы VIII Международной академии наук и экологии и безопасности жизнедеятельности «Риски в современном мире: идентификация и защита»* - СПб.: 2004. – С.32-35.

131. Клебанов Ф.С. О современной концепции безопасности // *Неделя горняка.*- Вып. 1. - М.: Изд-во МГГУ, 2002. - С. 191-196.

132. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности - М.: Наука, 1965. – 524 с.

133. Методика оценки последствий аварий на пожаро-, взрывоопасных объектах - М.: ВНИИ ГОЧС, 1996. - 32 с.

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

135. Методическое руководство по оценке

степени безопасности на магистральных нефтепроводах. Руководящий документ. - М.: Государственное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности» Госгортехнадзора России, 2000. - 95 с.

136. Бесчастнов В.М., Соколов В.М., Кац М.И. Аварии в химических производствах и меры их предупреждения - М.: Химия, 1976. - 162с.

137. Гельфанд Б.Е., Бартенев А.М., Дорофеев С.Е. и др. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей - М.: НТЦ, 1998. - 32с.

138. Какенов К.С. К вопросу об определении параметров взрыва аэрозолей в помещениях взрывоопасных производств // Материалы международной научно-практической конференции «Эффективные инструменты современных наук». – Прага, 2011. - С.104 – 106.

139. Какенов К.С., Плотников В.М., Дрижд Н.А., К вопросу о методике оценки опасностей и аварийности технологических процессов // Вестник КарГУ, 2012. - №2. - С. 23 – 25.

140. Покровский Г.И. Взрыв - М.: Недра, 1973.- 156 с.

140. Pietersen C.M. Consequences of accidental of hazardous material // J. Loss Process Ind.-1990.-V.3.- January.- P.112-118.

141. Детонация и взрывчатые вещества // Материалы международных симпозиумов по детонации и динамике высоких давлений - М.: Мир, 1981.- 452 с.

142. Жевняк Р.М., Карпук А.А., Унукович В.Т. Теория вероятностей и математическая статистика - Мн: Харвест, 2000. - 384 с.