

На правах рукописи



Савенков Антон Юрьевич

**РАСЧЕТ ПОДЗЕМНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СООРУЖЕНИЙ НА
АВАРИЙНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ В НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ
ПОСТАНОВКЕ**

2.1.9 – Строительная механика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2023 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

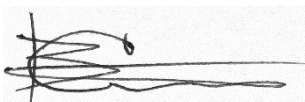
- Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор
Мкртычев Олег Вартанович
- Официальные оппоненты:** **Пшеничкина Валерия Александровна**
доктор технических наук, профессор,
Волгоградский государственный строительный университет, заведующая кафедрой
«Строительные конструкции, основания и надежность сооружений»
- Боков Игорь Алексеевич**
кандидат технических наук,
АО «НИЦ «Строительство»
НИИОСП им. Н.М. Герсевича, заведующий лабораторией механики грунтов
- Ведущая организация:** АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений – ЦНИИПромзданий»

Защита диссертации состоится «13» сентября 2023 г. в 15:00 (по местному времени) на заседании диссертационного совета 24.2.339.05, созданного на базе ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д.26, в Зале Учёного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» и на сайте <http://www.mgsu.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сидоров Виталий
Валентинович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Для зданий и сооружений повышенного уровня ответственности, либо объектов, на которых возможно одновременное пребывание более пяти тысяч человек должны выполняться требования Федерального закона №68 «О защите населения и территории от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера». Одним из требований является устройство встроенных подземных сооружений, предназначенных для защиты населения от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Расчет таких сооружений необходимо выполнять на воздействие воздушной ударной волны и волн сжатия в грунте, кроме того, для встроенных сооружений необходимо выполнять расчет на воздействие обломков разрушающегося здания и завала от них.

Действующие нормативные методики основаны на линейных статических методах расчета и предполагают определенные допущения при расчете на ударные волны, что может привести к трудно оценимым погрешностям в результатах расчетов. Рассматриваемые в данных задачах процессы являются высоконелинейными и быстротекущими. Для получения адекватных результатов необходимо применение методов, основанных на более строгих постановках.

В связи с этим **актуальной задачей является** разработка методик расчета подземных сооружений, предназначенных для защиты населения и территории от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера с использованием более строгих нелинейных динамических постановок. Применение методов теории надежности строительных конструкций позволяет учесть явно выраженный случайный характер исходного взрывного воздействия и получить более адекватные результаты при расчете зданий и сооружений.

Степень разработанности исследования. Различными проблемами в области динамики защитных сооружений занималось большое количество ученых: Б.Г. Корнев, Б.А. Рабинович, Б.А. Олисов, А.П. Синицын, О.Е. Власов, А.Н. Бирбрайер и А.Ю. Роледер, Р. Клаф и Дж. Пензиен, А.В. Мишуев, И.М. Рабинович, В.И. Жарницкий, В.А. Котляревский, Н.Н. Попов, Б.С. Расторгуев, А.И. Плотников, Д.З. Хуснутдинов, Н.Н. Белов, М.Д. Боданский, М.Ф. Барштейн, Б.Д. Христофоров, У. Бейкер, П. Кокс, П. Уэстайн. На основе данных работ созданы отечественные нормативные документы, пособия, и пр., по которым в настоящий момент выполняются расчеты подземных защитных сооружений.

В настоящий момент вопросами динамики сооружений при аварийных воздействиях, распространением воздушных ударных волн, воздействиями взрывов на здания и сооружения, в том числе с использованием нелинейных подходов, занимаются: Н.А. Антонов, Н.Н. Белов, С.В. Вальгер, В.И. Голяков, В.Б. Дорожинский, Н.Г. Келасьев, О.В. Кабанцев, С.Н. Латушкин, О.В. Мкртычев, И.А. Приходько, А.С. Павлов, В.А. Пшеничкина, А.Е. Саргсян, А.Г. Тамразян, В.Г. Теличко, И.Н. Тихонов, Н.Н. Трекин, Г.П. Тонких.

Целью работы является разработка методик расчета подземных сооружений на воздействие ударных волн в газодинамической постановке с помощью нелинейных динамических методов, в том числе с учетом случайного характера внешнего взрывного воздействия.

В соответствии с поставленной целью **решались следующие задачи:**

– анализ методов и методик расчета зданий и сооружений на взрывные воздействия;

- определение параметров исходного воздействия и исследование методов моделирования фронта воздушной ударной волны;
- сравнительный анализ результатов расчета, полученных эквивалентным статическим и газодинамическим методами, на примере расчета промышленного здания при воздействии воздушной ударной волны;
- исследование реакции подземного сооружения на воздействие точечных взрывов;
- исследование реакции подземного сооружения на воздействие падающих предметов;
- решение задачи о воздействии ударной волны на подземное железобетонное сооружение стеновой конструктивной схемы с помощью нелинейного динамического метода;
- решение задачи о воздействии ударной волны на многоэтажное здание с учетом возможного обрушения надземной части на покрытие встроенного подземного сооружения;
- оценка надежности сооружения при воздействии воздушной ударной волны со случайными параметрами.

Объектом исследования являются: подземные железобетонные сооружения, в том числе, встроенные в нижние этажи жилых и общественных зданий, предназначенные для защиты населения от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

Предметом исследования являются: напряженно-деформированное состояние подземных сооружений при воздействии воздушных ударных волн, в том числе с последующим обрушением вышестоящего здания, надежность несущих конструкций подземных сооружений.

Научная новизна работы: разработаны соответствующие нелинейные динамические расчетные модели и методики, позволяющие исследовать поведение подземных сооружений при сложном комплексе нагрузок, вызванных воздействием воздушной ударной волны, в том числе с учетом обрушения вышестоящих конструкций здания, а также с учетом случайного характера внешнего воздействия.

Теоретическая значимость работы состоит в развитии нелинейных динамических методов расчета для применения к расчетам подземных сооружений с учетом конструктивной нелинейности (разрушения конструкций).

Практическая значимость работы заключается в том, что:

- результаты исследований могут быть применены исследовательскими и проектными организациями при проектировании встроенных подземных сооружений на воздействия воздушных ударных волн и падающих предметов;
- результаты исследований могут применяться при проведении численных экспериментов для верификации моделей подземных сооружений по результатам натурных исследований отдельных несущих элементов.

Методология и методы исследования. Методологической основой научной диссертационной работы явились исследования отечественных и зарубежных авторов в области динамики сооружений при аварийных воздействиях и численных методов расчета. В диссертации использовались численные методы, реализованные в конечноэлементных программных комплексах.

Личный вклад автора диссертации заключается в следующем:

- выполнен анализ методов и методик расчета зданий и сооружений на взрывные воздействия;

- определены параметры и методы моделирования исходного воздействия воздушной ударной волны;
- выполнен сравнительный анализ результатов расчета нормативным эквивалентным статическим и предлагаемым газодинамическим методом;
- выполнено моделирование взаимодействия ударных волн с грунтовым массивом с расположенным в нем подземным железобетонным сооружением;
- решена задача о воздействии ударной волны на подземное железобетонное сооружение стеновой конструктивной схемы с помощью нелинейного динамического метода;
- решена задача о воздействии ударной волны на многоэтажное здание с учетом обрушения надземной части здания на покрытие встроенного подземного сооружения;
- определены и исследованы числовые характеристики случайных параметров воздействия воздушной ударной волны;
- выполнена оценка надежности отдельно стоящей конструкции при воздействии воздушной ударной волны со случайными параметрами;
- выполнена оценка надежности встроенного подземного сооружения на воздействие воздушной ударной волны со случайными исходными параметрами.

Проведенные в диссертационной работе исследования выполнялись автором лично.

Степень достоверности результатов диссертационной работы достигается:

- применением фундаментальных гипотез, которые приняты в строительной механике, механике деформируемого твердого тела, динамике сооружений и теории надежности строительных конструкций;
- путем сравнения полученных результатов с данными экспериментов, выполненных различными организациями и авторами работ по данной тематике;
- использованием при расчете апробированных в научной и проектной практике численных методов расчета несущих конструкций, верифицированных моделей материалов и расчетных комплексов.

Апробация работы. Основные положения диссертации были доложены на следующих научно-практических конференциях:

- V Международный промышленный форум «Территория NDT. Неразрушающий контроль. Испытания. Диагностика» Территория НКТД. Круглый стол «Неразрушающий контроль и техническая диагностика состояния объектов наземной космической инфраструктуры космодромов России, а также объектов крупной энергетики и народного хозяйства» Тема доклада: Обеспечение конструктивной надежности и долговечности строительных конструкций сооружений объектов наземной космической инфраструктуры на этапе проектирования (авторы: Крылов В.В. Тимофеев Д.Е., Панфилов Д.П., Савенков А.Ю., Никонов Е. К.). Дата проведения - 28 февраля 2018г;
- VIII Международная научная конференция «Задачи и методы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» («Золотовские чтения»). Дата проведения - 27 марта 2019г. Место проведения: Российская Федерация, г. Москва, ул. Большая Дмитровка, д. 24, стр. 1, Российская академия архитектуры и строительных наук (РААСН). Тема доклада: Анализ поведения грунтов при взрыве. Моделирование воздействия ударной волны на подземное сооружение;
- XXIII International Scientific Conference on Advance In Civil Engineering CONSTRUCTION THE FORMATION OF LIVING ENVIRONMENT 2020 23-26 сентября

(онлайн). Тема доклада: Надежность строительных конструкций при воздействии ударной волны;

- VIII Международная научная конференция «Интеграция, партнёрство и инновации в строительной науке и образовании (IPICSE–2022)» 10 - 11 ноября 2022г. Тема доклада: Газодинамический подход к расчету подземного сооружения на воздействие воздушной ударной волны.

Публикации:

Научные результаты достаточно полно изложены в 9 научных публикациях, 5 из которых опубликованы в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, и 1 работа опубликована в журнале, индексируемом в международной реферативной базе Scopus.

На защиту выносятся:

- анализ методов и методик расчета зданий и сооружений на взрывные воздействия;
- определение параметров исходного воздействия воздушной ударной волны;
- сравнительный анализ результатов расчета эквивалентным статическим и газодинамическим методом;
- моделирование взаимодействия ударных волн с грунтовым массивом и расположенной в нем железобетонной конструкцией;
- решение задачи о воздействии ударной волны на подземное железобетонное сооружение стеновой конструктивной схемы с помощью нелинейного динамического метода;
- решение задачи о воздействии ударной волны на многоэтажное здание с учетом возможного обрушения надземной части на покрытие встроенного подземного сооружения;
- оценка надежности сооружений при воздействии воздушной ударной волны со случайными параметрами.

Структура и объем диссертации: диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (184 наименования). Общий объем диссертации составляет 143 страниц, включая 5 таблиц и 114 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, приведена общая характеристика работы.

В первой главе рассмотрены основные нормативные положения в части расчета подземных сооружений для защиты населения от аварийных ситуаций природного и техногенного характера.

Показано, что для встроенных подземных сооружений в нижние этажи жилых и общественных зданий характерна расчетная ситуация, когда расчет необходимо выполнять на комплекс воздействий, вызванных воздушной ударной волной (далее ВУВ), в том числе на нагрузки, вызванные разрушением надземной части с последующим образованием завала на покрытии (рисунок 1, а).

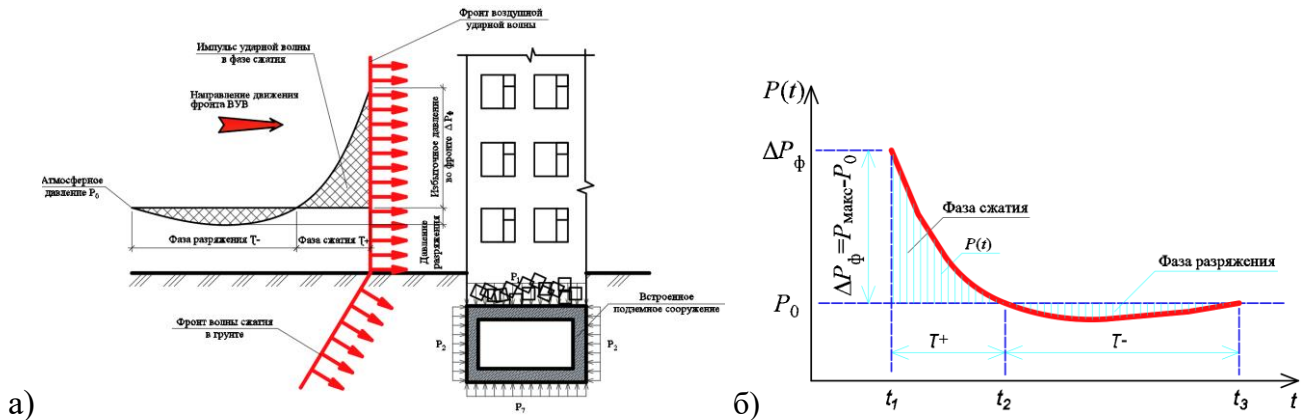


Рисунок 1. а) Схема воздействия ВУВ на встроенное подземное сооружение; б) изменение давления во времени

Расчет подобных сооружений необходимо выполнять на воздействие детонационного взрыва (рисунок 1, б).

Обзор литературы по данной тематике показал, что существующие методики имеют некоторые недостатки. Они не позволяют учесть всю сложность происходящего процесса, что особенно важно при расчете встроенных в нижние этажи жилых и общественных зданий защитных подземных сооружений. Актуальной задачей является разработка методик для более адекватного расчета подобных сооружений. Предлагается использование газодинамического подхода с использованием методов нелинейной динамики.

Приведены основы газодинамических методов расчета, которые применяются в исследованиях. Анализ исследований сооружений, выполненных различными авторами с использованием газодинамического подхода, показал, что исследования подземных сооружений имеют недостаточную степень разработанности в подобных постановках. Это связано со сложностью моделирования взаимодействия ВУВ с поверхностью грунта, с последующим формированием волн сжатия в грунте, которые взаимодействуют с подземным сооружением. Кроме того, для встроенных подземных сооружений необходимо выполнять расчет на падение обломков разрушенных конструкций надземной части здания, а также на нагрузки от завала на покрытие сооружения.

Для реализации газодинамического подхода создается воздушная область из объемных конечных элементов, моделирующих воздушное пространство или грунтовый массив, куда помещается сооружение или конструкция, на которую воздействует фронт ВУВ, распространяющийся в данной области (рисунок 2, а).

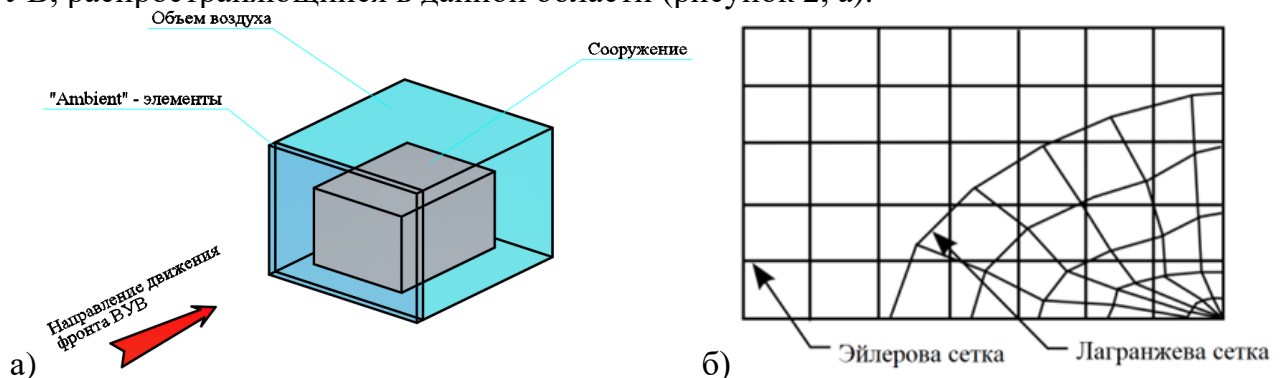


Рисунок 2. а) Расчетная модель газодинамического подхода; б) схема лагранжевого и эйлера подходов

При решении задачи пространственной дискретизации, движение сред может быть описано методами Лагранжа и Эйлера, которые различаются в подходе к описанию движению среды.

При использовании лагранжевого метода моделирования движения сред сетка деформируется и элементы движутся вместе с назначенным материалом. Данный метод подходит для описания элементов из твердых материалов. Недостатком такого метода является возможное значительное искажение сетки КЭ при больших деформациях, что приводит к малым временным шагам в процессе расчета, появлению вырожденных элементов и других ошибок.

При использовании эйлерового метода описания движения сред сетка остается недеформированной, а материал может перетекать от одного элемента к другому. Метод подходит для описания движения жидких материалов, таких как газ или вода, а также грунтов.

При решении практических задач взаимодействия твердых тел и жидких материалов (FSI - fluid-structure interactions), применяются совместно оба метода (рисунок 2, б), дополняющие друг друга (ALE - Arbitrary Lagrangian Eulerian) путем объединения лучших сторон лагранжевых и эйлеровых подходов.

Газодинамический подход с использованием эйлерового подхода основывается на следующих уравнениях:

- 1) Уравнение сохранения массы:

$$\dot{\rho} + \rho \operatorname{div}(\mathbf{v}) = 0, \quad (1)$$

где $\dot{\rho}$ – производная плотности по времени, \mathbf{v} – вектор скорости.

- 2) Уравнение сохранения количества движения:

$$\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{f} - \frac{1}{\rho} \operatorname{grad}(P), \quad (2)$$

где $\dot{\mathbf{v}}$ – вектор ускорения заданной частицы среды, при движении в пространстве среды;

\mathbf{f} – вектор массовых сил, отнесенный к единице массы;

P – давление.

- 3) Уравнение сохранения энергии:

$$\dot{E} + \mathbf{v} \operatorname{grad}(E) - \frac{p}{\rho^2} (\dot{\rho} + \mathbf{v} \operatorname{grad}(\rho)) = 0, \quad (3)$$

где E – внутренняя энергия газа, отнесенная к единице массы.

Уравнения 1-3 в ортогональной системе принимают следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\rho}{dt} + u \frac{d\rho}{dx} + v \frac{d\rho}{dy} + w \frac{d\rho}{dz} + \rho \left(\frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} \right) \\ \frac{du}{dt} + u \frac{du}{dx} + v \frac{du}{dy} + w \frac{du}{dz} + \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dx} = 0 \\ \frac{dv}{dt} + u \frac{dv}{dx} + v \frac{dv}{dy} + w \frac{dv}{dz} + \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dy} = 0 \\ \frac{dw}{dt} + u \frac{dw}{dx} + v \frac{dw}{dy} + w \frac{dw}{dz} + \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dz} = 0 \\ \frac{dE}{dt} + u \frac{dE}{dx} + v \frac{dE}{dy} + w \frac{dE}{dz} - \frac{p}{\rho^2} \left(\frac{d\rho}{dt} + u \frac{d\rho}{dx} + v \frac{d\rho}{dy} + w \frac{d\rho}{dz} \right) = 0 \\ p = p(\rho, E) \end{array} \right. \quad (4)$$

где $p=p(\rho, E)$ – уравнение состояния материала.

Воздушная область описывается полиномиальным уравнением состояния идеального газа:

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E_{ipv0}, \quad (5)$$

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1, \quad (6)$$

где P – давление; ρ – текущая плотность газа; ρ_1 – плотность газа в начальном состоянии; E_{ipv0} – удельная начальная внутренняя энергия газа, определяемая по формуле:

$$E_{ipv0} = \rho_0 C_v T, \quad (7)$$

где C_v – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме;

T – начальная температура газа.

$C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6$, $C_4 = C_5 = \gamma - 1$ – безразмерные постоянные полиномиального уравнения, принимаются по справочным данным; γ – отношение удельной теплоемкости при постоянном давлении к удельной теплоемкости при постоянном объеме.

Поведение продуктов детонации тротила описывается уравнением состояния Джонса-Вилкинса-Ли (JWL):

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V}, \quad (8)$$

где

$$V = \frac{\rho_0}{\rho} = \frac{v}{v_0} - \text{относительный удельный объем.}$$

$A, B, C, R_1, R_2, \omega$ – эмпирические константы;

E_0 – внутренняя энергия на единицу объема;

A, B и E_0 – имеют единицы давления;

R_1, R_2, ω и v_0 – безразмерные.

Применение газодинамического подхода возможно с использованием прямого интегрирования уравнений движения по явной схеме. В работе используется метод центральных разностей.

Решение задач явным методом описывается следующими уравнениями:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F}^a, \quad (9)$$

где \mathbf{u} – вектор узловых перемещений, $\dot{\mathbf{u}} = \mathbf{v}$ – вектор узловых скоростей, $\ddot{\mathbf{u}} = \mathbf{a}$ – вектор узловых ускорений. \mathbf{M} – матрица масс системы, \mathbf{C} – матрица демпфирования, \mathbf{K} – матрица жесткости, а \mathbf{F}^a – вектор действующих на систему нагрузок.

Вектор ускорений определяется выражением:

$$\mathbf{a}_n = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{F}_n^{ext} - \mathbf{F}_n^{int}) \quad (10)$$

$$\mathbf{v}_{t+\Delta t/2} = \mathbf{v}_{t-\Delta t/2} + \mathbf{a}_t \Delta t \quad (11)$$

$$\mathbf{u}_{t+\Delta t} = \mathbf{u}_t + \mathbf{v}_{t+\Delta t/2} \frac{\Delta t_t + \Delta t_{t+\Delta t}}{2} \quad (12)$$

Решение задачи контактного взаимодействия между лагранжевыми составляющими расчётной модели, а также с эйлеровой сеткой производится на основании метода штрафных функций:

$$F_p^n = A \cdot n(K_n \Delta L + K_D \Delta \dot{L}). \quad (13)$$

Тангенциальные силы трения:

$$F_p^n = \min(\mu F_p^n, AK_T \Delta L_T). \quad (14)$$

Обзор моделей материалов для решения задач в нелинейной газодинамической постановке позволил выделить следующие варианты моделирования железобетонных конструкций с использованием различных подходов к моделированию бетона и арматуры:

1. Моделирование бетона выполняется с помощью восьмиузловых конечных элементов, с интегрированием по объему. Арматура при этом моделируется стержневыми конечными элементами с использованием идеальной упругопластической модели материала с ограничением пластических деформаций $\epsilon_{пред}$. (модели бетона Уинфрита, и модель бетона Continuous Surface Cap Model CSCM).

Модель бетона Уинфрита, учитывает дополнительные эффекты скорости нагружения, а также наличие трещин. Нелинейная модель бетона Continuous Surface Cap Model (CSCM) позволяет, как и модель бетона Уинфрита, учесть совместную работу бетона и арматуры и описывается замкнутой поверхностью (шатровая модель с непрерывной предельной поверхностью) с наличием, так называемого, «колпака» (рисунок 3).

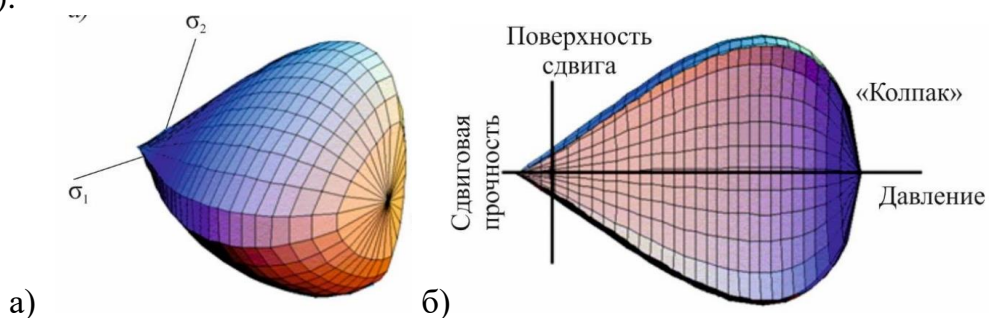


Рисунок 3. Модель поверхности текучести с «колпаком» (CSCM):

а) в пространстве главных напряжений; б) вид сбоку

2. Моделирование работы бетона и арматуры может производиться с помощью структурных элементов, когда плиты моделируются оболочечными элементами, колонны - стержневыми, при этом армирование учитывается в виде слоя эквивалентной толщины в соответствии с реальным расположением в элементе (модель бетона Concrete EC2, основанная на положениях норм Еврокод-2).

Модель Concrete EC2 позволяет учесть особенности работы бетона при сжатии, образование трещин в бетоне при растяжении, а также появление текучести в арматуре. При достижении максимальными главными напряжениями предела прочности на растяжение происходит растрескивание бетона. После начала растрескивания растягивающие напряжения уменьшаются при увеличении деформаций.

Для моделирования контактного взаимодействия бетона и арматуры используется механизм Лагранжево-Эйлеровых связей.

Во второй главе рассматриваются подходы к моделированию фронта ВУВ при решении задач в газодинамической постановке с использованием методов нелинейной динамики.

Расчет подземных сооружений для защиты населения при чрезвычайных ситуациях, а также основных сооружений АЭС, нормативные документы предписывают выполнять на плоский фронт ВУВ с определенными параметрами избыточного давления и временем воздействия, в зависимости от назначения сооружения (рисунок 4).

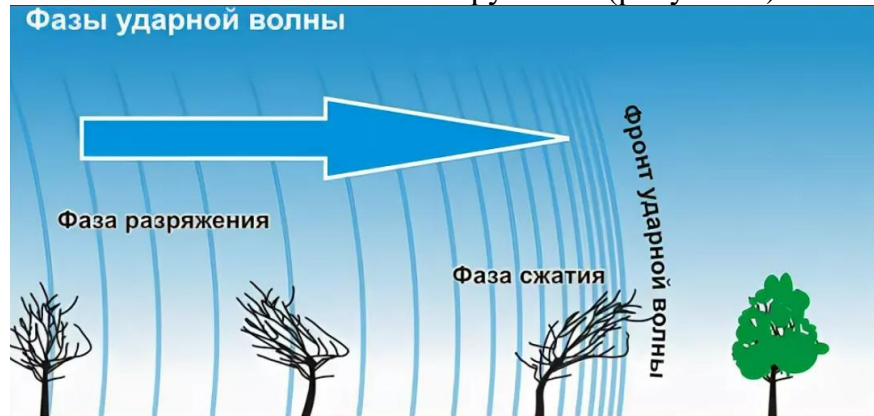


Рисунок 4. Плоский фронт воздушной ударной волны

Для формирования плоского фронта ВУВ к границе расчетной области прикладывается нагрузка с изменяющимся давлением во времени с заданными параметрами (рисунок 5, а). Данный график хорошо описывается уравнением Фридендлера (15) (рисунок 5, б):

$$P(t) = P_0 + \Delta P \left(1 - \frac{t}{t_0}\right) e^{-b \frac{t}{t_0}} \quad (15)$$

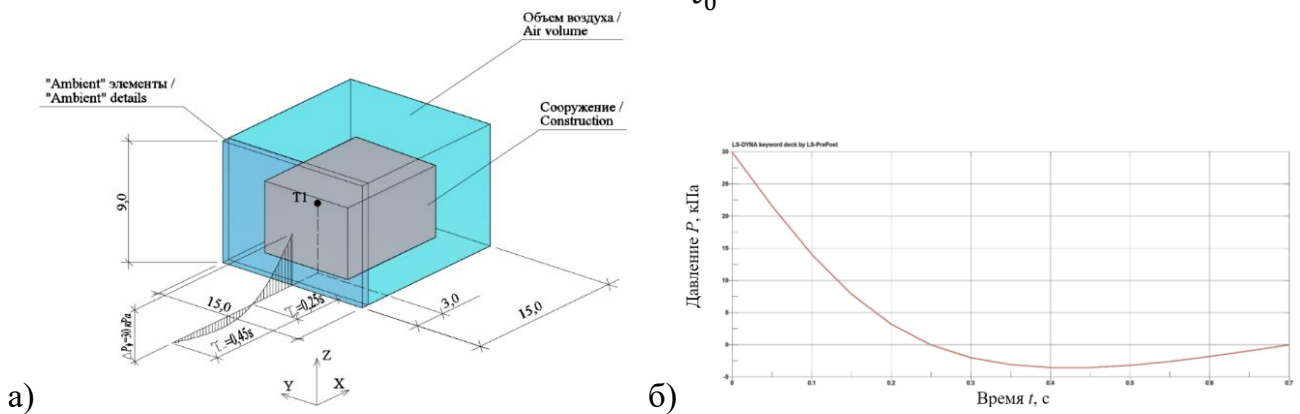


Рисунок 5. а) Расчетная модель; б) график воздействия

Данный подход применен при расчете отдельно стоящей железобетонной стены при воздействии на нее ВУВ с давлением во фронте $\Delta P_{\phi}=30$ кПа и длительностью фазы сжатия $\tau_+=0,25$ с (рисунки 6а и 6б).

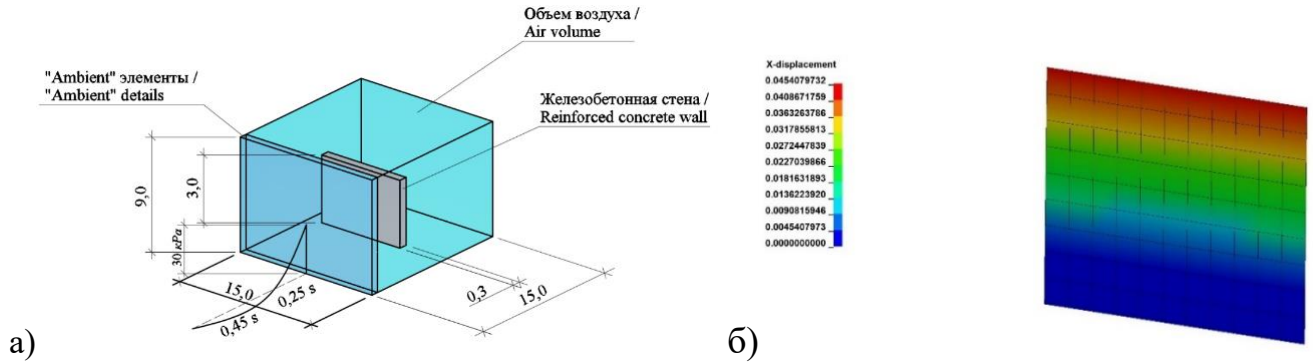


Рисунок 6. а) Расчетная модель; б) изополю перемещений стены

По результатам сравнительного анализа результатов расчета 2-х этажного 2-х пролетного сооружения с помощью эквивалентного статического (рисунок 7) и газодинамического методов (рисунок 8) можно сделать вывод о существенном различии напряженно-деформированного состояния конструкций в рассмотренных вариантах. При этом следует отметить, что эквивалентный статический метод дает заниженное значение несущей способности сооружения.

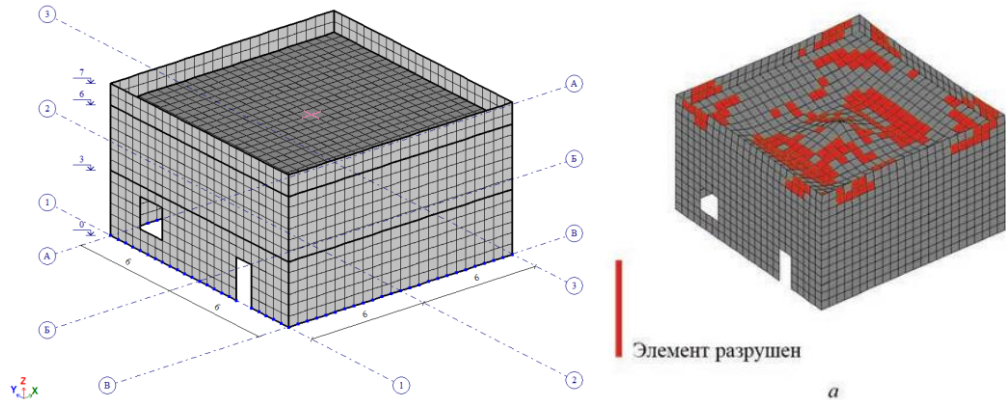


Рисунок 7. Эквивалентный статический метод расчета

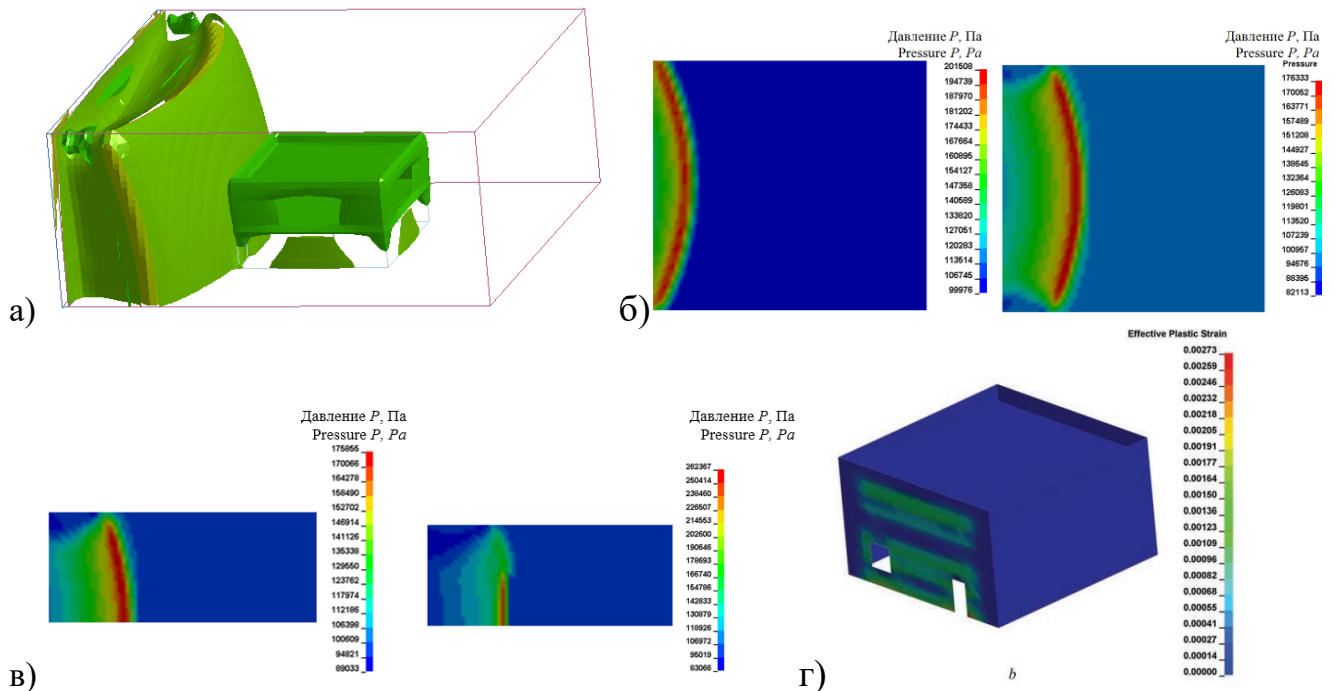


Рисунок 8. Газодинамический метод расчета: а) подход фронта ВУВ к сооружению; б) тоже вид сверху; в) вид с боку; г) пластические деформации в сооружении

В третьей главе для решения задач взаимодействия ударных волн, распространяющихся в грунте, с подземным сооружением предлагается для моделирования грунтового основания использовать модель Мора-Кулона. Отмечено, что данная модель является наиболее подходящей и апробированной для решения рассматриваемых динамических задач.

Поверхность текучести Мора-Кулона (рисунок 9) может быть определена выражением:

$$F = -P \sin \varphi + K(\theta) \sqrt{J_2} - c \cos \varphi = 0, \quad (16)$$

где P – среднее давление; φ – угол внутреннего трения; $K(\theta)$ – функция угла θ в девиаторной плоскости; J_2 – второй инвариант девиатора напряжений; c – сцепление.

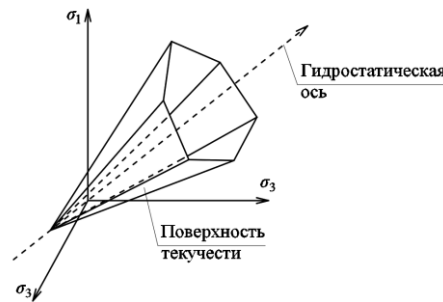


Рисунок 9. Поверхность текучести Мора-Кулона

В работе также используется модифицированная грунтовая модель Мора-Кулона с поверхностью текучести в виде гиперболоида, «приближенного» к поверхности Мора-Кулона:

$$F = -P \sin \varphi + \sqrt{J_2 K(\theta)^2 + a^2 \sin^2 \varphi} - c \cos \varphi = 0, \quad (17)$$

Рассмотрено распространение ударной волны при точечном взрыве на поверхности грунта (рисунок 10).

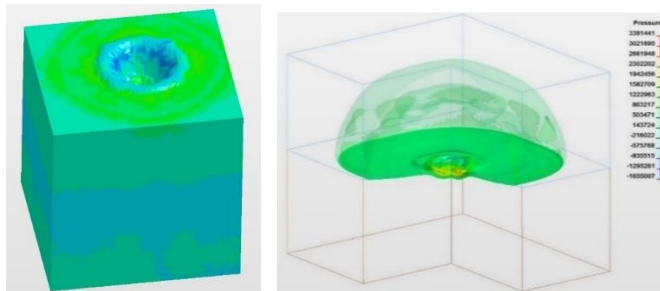


Рисунок 10. Точечный взрыв на поверхности грунта

Также решена задача о распространении ударной волны при точечном взрыве на глубине 1м (рисунок 11).

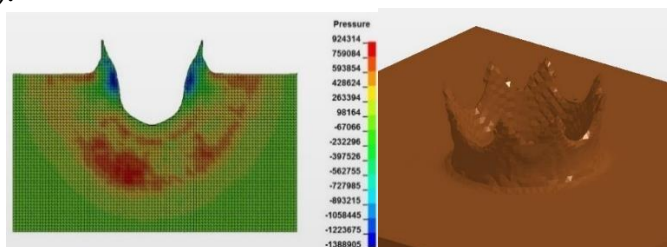


Рисунок 11. Точечный взрыв на глубине 1м

Ниже приведены результаты расчета при воздействии взрыва на подземное сооружение.

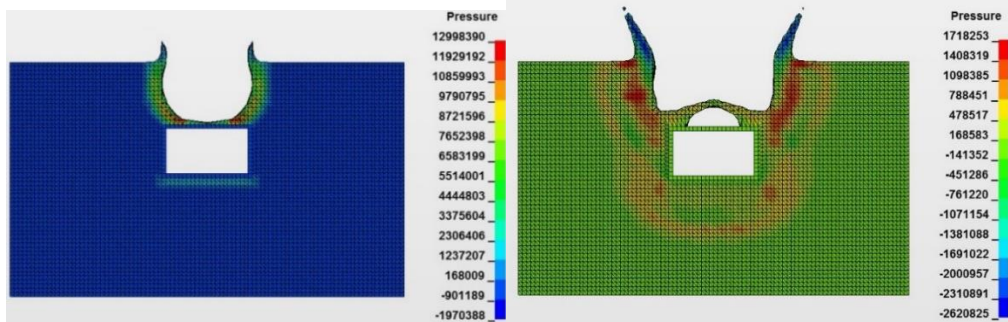


Рисунок 12. Воздействие на подземное сооружение, взрыв на глубине 1м

На рисунках 13-15 показаны изополя давлений в грунтовом массиве, а на рисунке 16 схема образования трещин в сооружении при воздействии, вызванном падающим ударником на поверхность грунта.

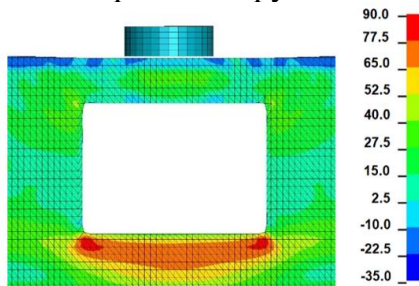


Рисунок 13. Изополя давлений (кПа) до удара

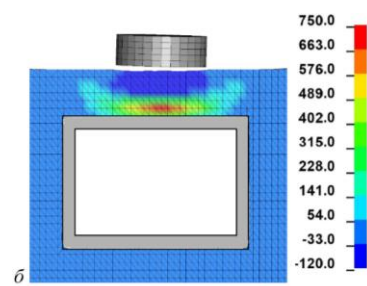


Рисунок 14. Изополя давлений (кПа) в момент времени 0,3248с после удара

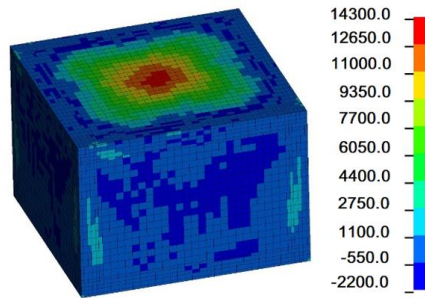


Рисунок 15. Изополя давлений на внешних поверхностях сооружения, кПа

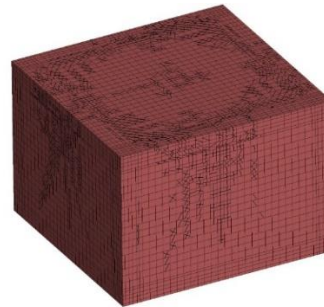


Рисунок 16. Схема образования трещин в сооружении

Приведено решение задачи о воздействии ВУВ на подземное железобетонное сооружение стеновой конструктивной схемы (рисунки 17-18).

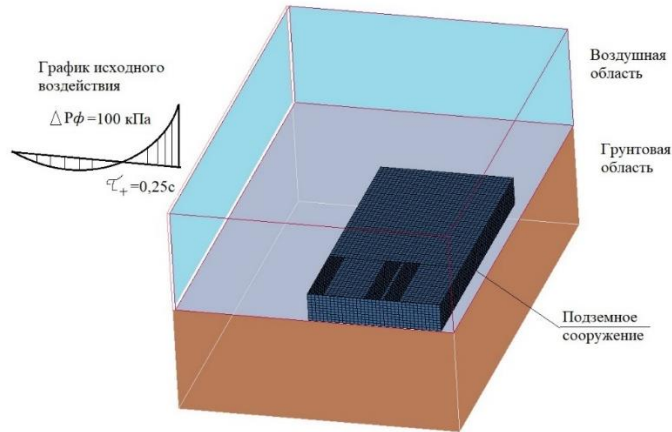


Рисунок 17. Расчетная схема подземного сооружения (участок покрытия условно не показан)

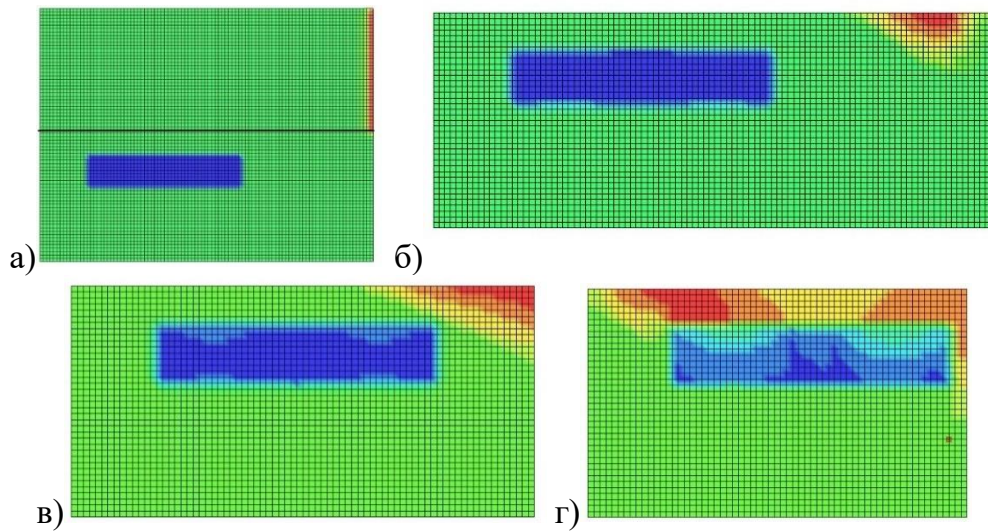


Рисунок 18. Изополя давлений (кПа) при взаимодействии ударных волн с подземным сооружением: а) вид сбоку, начало действия ВУВ; б) формирование волны сжатия в грунте; в) волна сжатия перед подходом к сооружению; г) воздействие волны сжатия на покрытие

В работе анализируются подходы к моделированию, позволяющие исследовать характер разрушений строительных конструкций, в том числе, в сравнении с результатами экспериментов (рисунки 19-21).

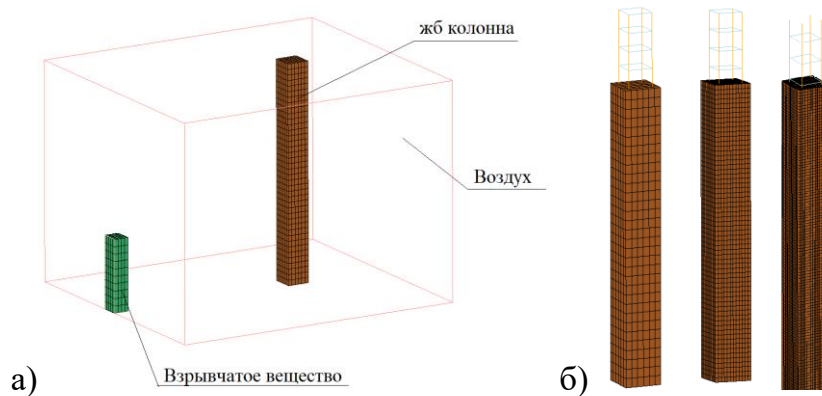


Рисунок 19. а) Расчетная модели колонны при воздействии точечного взрыва; б) схемы колонн с разными размерами КЭ для исследования сходимости

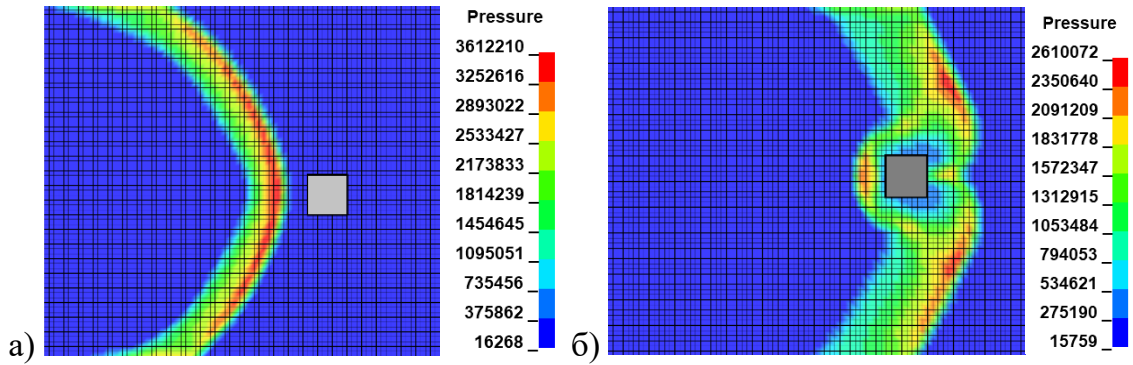


Рисунок 20. Схема воздействия воздушной ударной волны на колонну:
 а) до подхода ВУВ к колонне; б) при воздействии на колонну

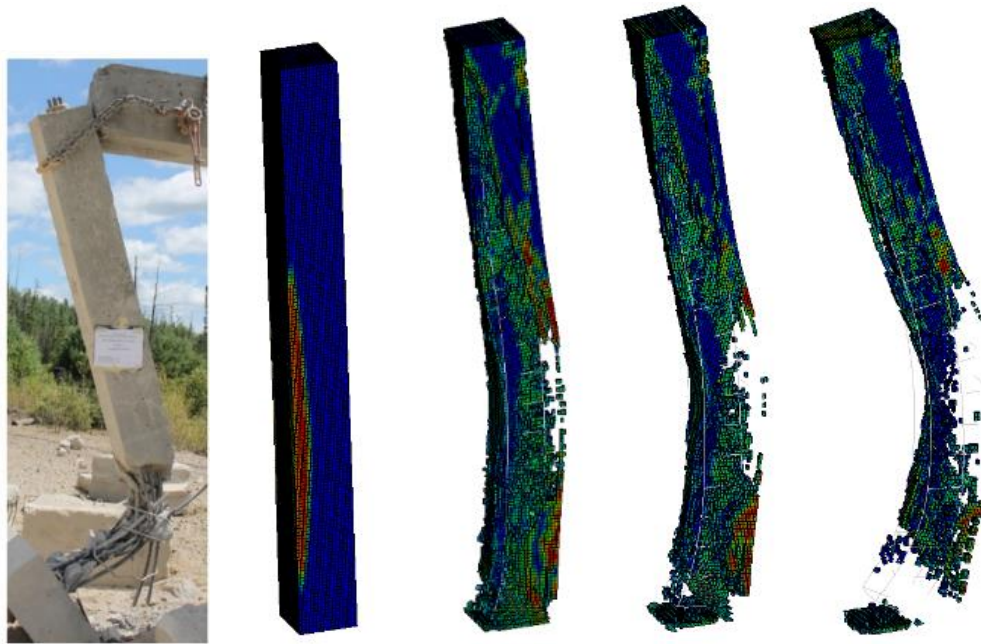


Рисунок 21. Схема разрушения колонны

Выполнен расчет встроенной подземной части сооружения на воздействие ВУВ, волн сжатия в грунте, а также на нагрузки от завала при обрушении вышестоящих конструкций (рисунок 20, 21).

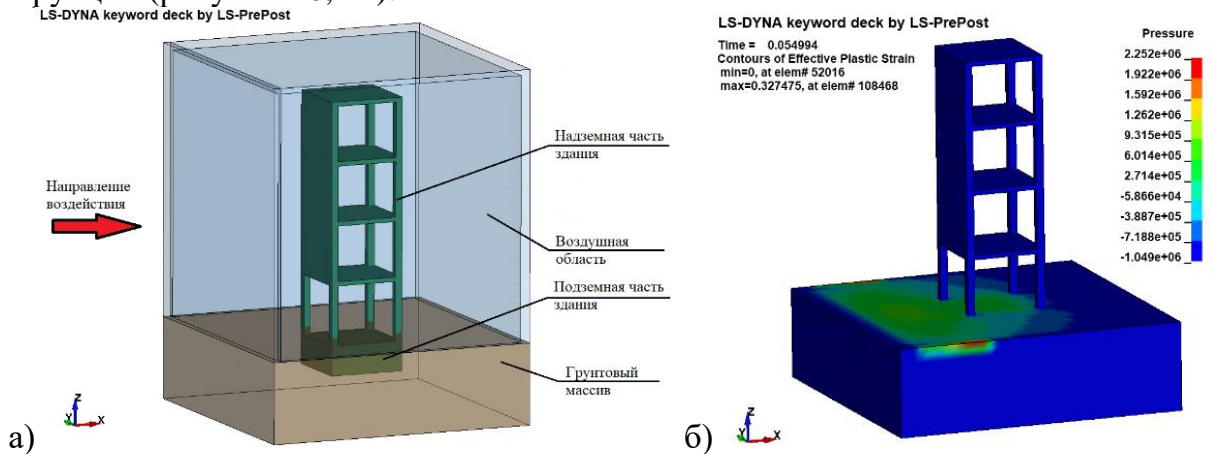


Рисунок 22. а) Расчетная модель сооружения; б) образование волны сжатия на поверхности грунтового массива

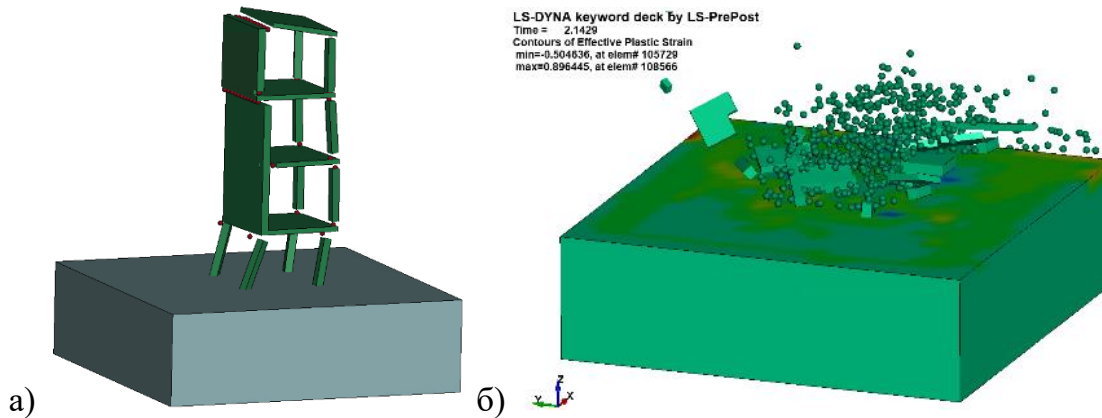


Рисунок 23. а) Процесс обрушения сооружения, б) образование завала на покрытии подземной части сооружения

В четвертой главе отмечается, что исходные параметры ВУВ являются случайными и обладают большой изменчивостью. Для получения более адекватных результатов следует использовать вероятностные методы теории надежности строительных конструкций.

Вероятность отказа конструкции P_f при входных (исходных) параметрах, представленных случайными величинами, равна многомерному интегралу:

$$P_{rob} \{g(x_1, x_2, \dots, x_n) < 0\} = \int_{\Omega_n} \dots \int f(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (18)$$

В главе описывается ряд методов оценки надежности строительных конструкций, которые позволяют определить вероятность отказа системы. Показано, что для решения вероятностной задачи наиболее часто используется метод статистических испытаний (МСИ) как более универсальный. Для его реализации важной задачей является получение решения детерминированной задачи с определением возможных критериев отказа, а также определение вероятностных характеристик параметров нагрузок и прочности.

Согласно методу МСИ проводится n испытаний, в каждом из которых решается детерминированная задача.

Частота появления отказов, являющаяся оценкой искомой вероятности отказа, определяется по формуле:

$$v = \frac{m}{n} \approx P_f, \quad (19)$$

где v – частота отказов; m – количество отказов, n – общее число испытаний.

При $n \rightarrow \infty$ - $v \rightarrow P_f$, где P_f – вероятность отказа.

В главе производится моделирование давления во фронте ВУВ в виде нестационарного случайного процесса (рисунок 24). Отмечается, что для описания данного случайного процесса можно принять эффективную массу взрывчатого вещества $Q_{эф}$ и расстояние от центра взрыва R в качестве случайных величин с параметрами распределений в соответствии с имеющимися результатами экспериментальных исследований.

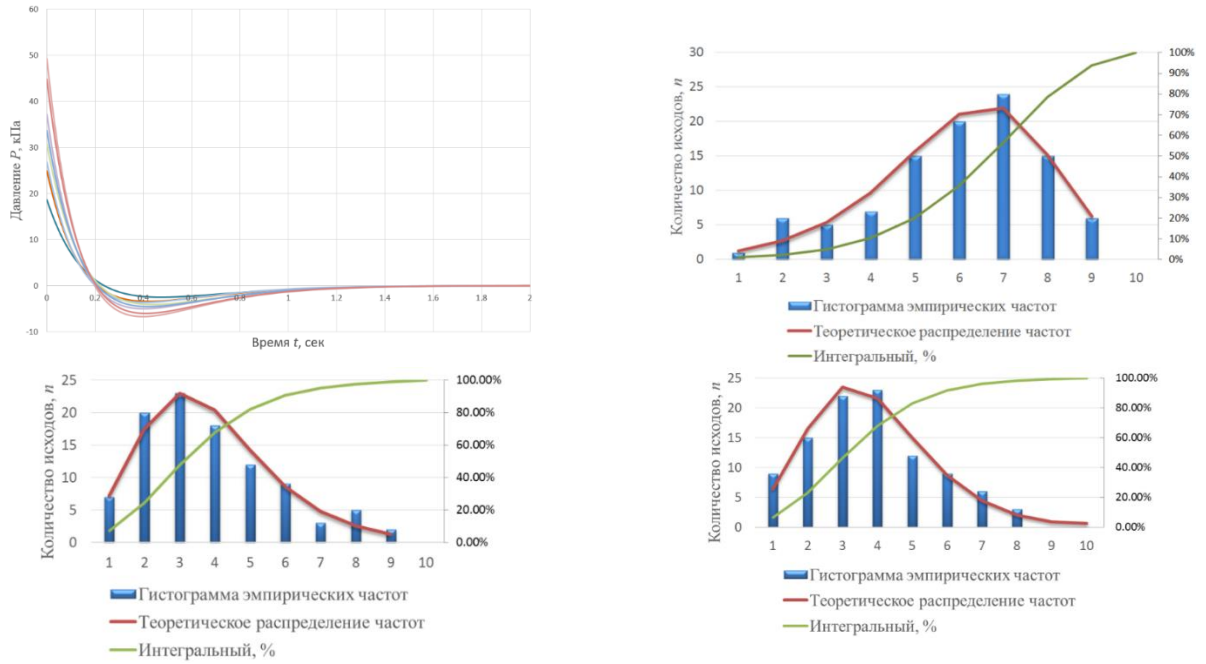


Рисунок 24. Реализации давления $P_i(x_i)$ как случайного процесса, гистограммы частот в сечениях процесса при $t=0,0$ с; $0,06$ с; $t=0,5$ с

Анализ показывает, что давление в различных сечениях случайного процесса может быть аппроксимировано логнормальным законом распределения (рисунок 24).

Произведена оценка надежности отдельно стоящей железобетонной стены при воздействии ВУВ. На рисунках 25-26 показаны результаты одного из статистических испытаний (детерминированное решение задачи), при котором зафиксирован отказ по критерию разрушения.

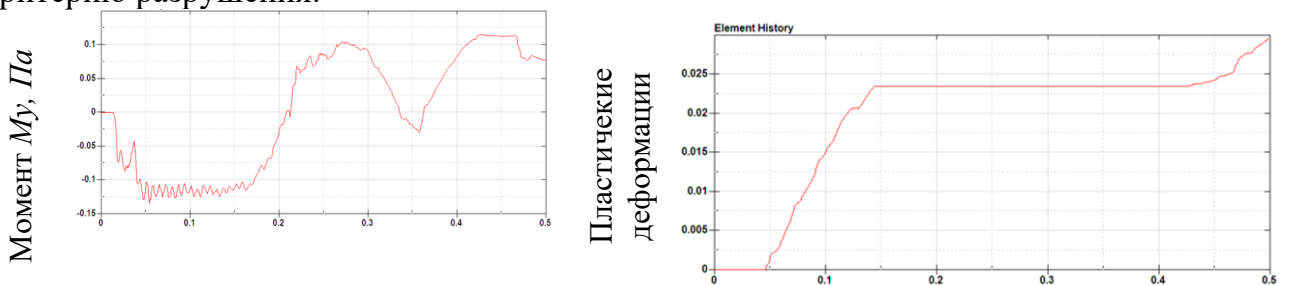


Рисунок 25. а) Момент M_y ; б) пластические деформации в основании стены,

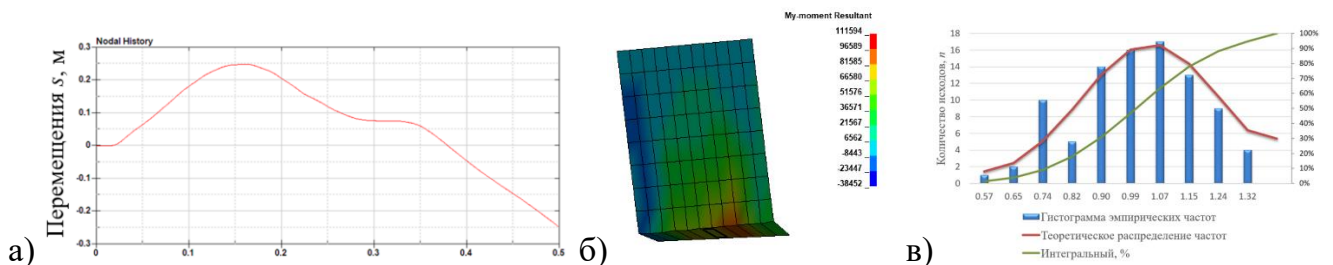


Рисунок 26. а) Перемещения верха стены; б) картина разрушений стены; в) гистограмма распределения значений максимального изгибающего момента M_y в основании железобетонной стены

Выполнена оценка надежности встроенного подземного сооружения при воздействии ВУВ ($\Delta P_\phi=100$ кПа) с учетом обрушения строительных конструкций

вышестоящего здания. Для решения детерминированной задачи рассмотрено 5-ти этажное железобетонное здание стеновой конструктивной схемы (рисунок 27), в котором встроенное подземное сооружение располагается в подземном этаже. Для решения данной задачи использован газодинамический подход.

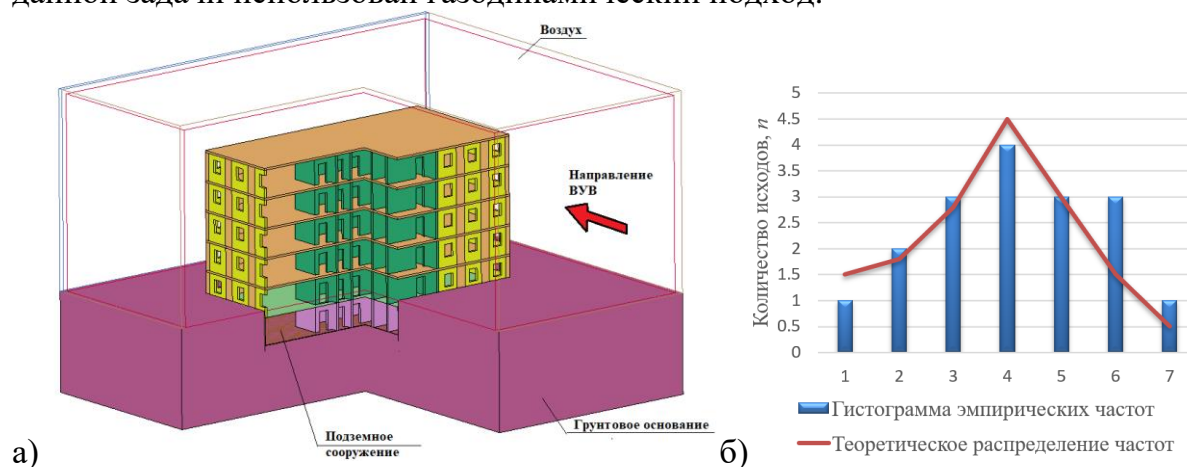


Рисунок 27. а) Расчетная модель здания, б) гистограмма максимальных изгибающих моментов M_y в покрытии над подземным сооружением

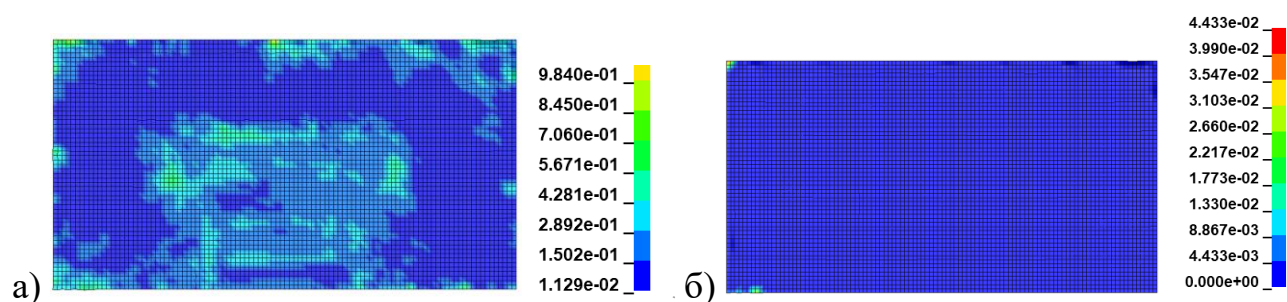


Рисунок 28. а) момент M_y в момент времени 0,1 с, МН·м/м б) пластические деформации в плите покрытия

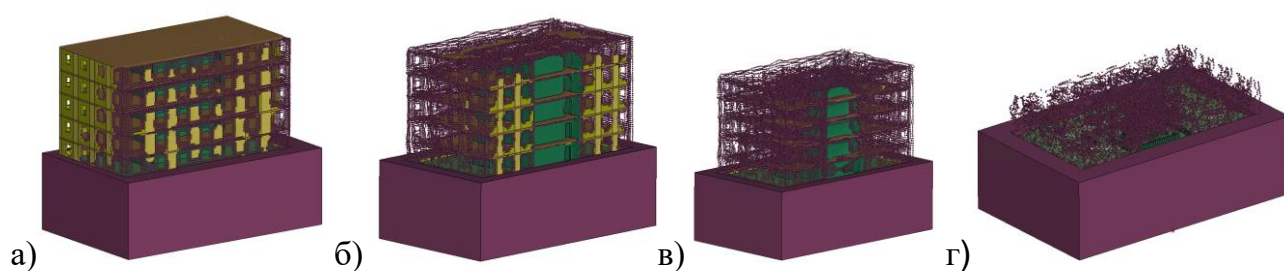


Рисунок 29. Процесс обрушения надземной части здания в различные моменты времени: а) 0,1 с; б) 0,5 с; в) 1,0 с; г) 3,0 с

Результаты расчета (рисунок 29) показывают, что при воздействии на здание воздушной ударной волны надземная часть здания полностью разрушается, что соответствует имеющимся результатам экспериментальных исследований. Кроме того, отмечается, что при воздействии воздушной ударной волны на покрытие подземного сооружения, в момент до начала обрушения вышестоящего здания, плита получает повреждения с образованием трещин и развитием пластических деформаций.

В результате вероятностного расчета получена гистограмма максимальных изгибающих моментов M_y в покрытии встроенного подземного сооружения (рисунок

276). Вероятность отказа покрытия по критерию превышения пластическими деформациями в арматуре предельно допустимых значений составляет $P_f < 0,1$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований получены следующие научные и практические результаты.

1. Выполнен анализ методов расчета подземных сооружений на воздействие воздушной ударной волны. В результате чего отмечено, что эквивалентный статический и динамический методы предполагают определенные допущения, и могут использоваться как предварительные. Для применения к встроенным подземным сооружениям эти методы недостаточно полно учитывают всю сложность происходящего процесса взаимодействия воздушной ударной волны со зданием, при котором дополнительно необходимо учитывать нагрузки от обрушения надземной части здания с последующим образованием завала на покрытии подземной части. Поэтому сделан вывод о том, что такие задачи необходимо решать в более строгой постановке с применением газодинамического подхода с использованием методов нелинейной динамики.

На основе газодинамического подхода разработана методика расчета сооружений на воздействие воздушных ударных волн. Показано, что при использовании газодинамического подхода при решении задач явным методом возможно учесть различные виды нелинейности в конструкциях, что позволяет получить более адекватную картину НДС, в том числе с учетом разрушений (конструктивная нелинейность). Кроме того, показано, что модели материалов, используемые в программных комплексах, позволяют выполнить анализ поведения железобетонных конструкций при моделировании разными подходами: с помощью объемных элементов для бетона с включениями армирования в виде стержневых конечных элементов, а также с помощью структурных элементов, позволяющих применять оболочечные и стержневые конечные элементы для моделирования железобетонных элементов с учетом реально установленного армирования, но описываемого, как интегрально распределенное по толщине элемента, таким образом существенно уменьшая время расчетов.

2. Рассмотрены варианты моделирования фронта воздушной ударной волны при использовании газодинамического подхода с целью определения параметров исходного воздействия воздушной ударной волны во фронте при подходе к сооружению. Показано, что использование точечных взрывов дает слишком короткое время фазы сжатия по сравнению с нормативными требованиями к воздействию. Использование таких воздействий не может быть применено для моделирования плоского фронта воздушной ударной волны, так как именно плоский фронт воздушной ударной волны необходимо рассматривать при выполнении расчетов несущих конструкций при проектировании подземных сооружений, предназначенных для защиты от аварийных воздействий природного и техногенного характера. Для формирования плоского фронта ударной волны предложено использование на границе расчетной области воздействия в виде давления во времени с заданными параметрами во фронте.

3. Выполнен сравнительный анализ результатов расчета с использованием эквивалентного статического метода и газодинамического подхода на примере расчета промышленного здания на воздействие воздушной ударной волны. Можно сделать вывод о существенном различии напряженно-деформированного состояния конструкций в рассмотренных вариантах. При этом следует отметить, что эквивалентный статический метод дает заниженное значение несущей способности сооружения.

4. Произведен анализ распространения фронта ударной волны в грунтовом массиве от точечных взрывов на поверхности грунта и на глубине, а также при воздействии фронта волны сжатия на расположенное в грунте подземное сооружение с использованием эйлера описания движения сред (газодинамический подход).

5. Выполнены исследования распространения фронта ударной волны в грунтовом массиве при падении на поверхность грунта тяжелых предметов.

По результатам проведенных исследований приведенных в п.4 и п.5 получено, что грунт при высокоскоростных воздействиях (точечные взрывы и падение тяжелых предметов) проявляет свойства жидкости, что позволяет применить к нему газодинамические подходы. Именно в такой постановке результаты численных расчетов наиболее точно совпадают с результатами натуральных экспериментов.

6. Предлагаемый газодинамический подход апробирован для применения к исследованию заглубленного подземного железобетонного сооружения стеновой конструктивной схемы.

7. Проанализированы методы моделирования разрушений строительных конструкций с учетом формирования вторичных осколков. Анализируются подходы, позволяющие исследовать характер разрушений строительных конструкций, в том числе, в сравнении с результатами экспериментов.

На примере многоэтажного здания показано применение данной методики, и отмечено, что в газодинамической постановке можно выполнять расчеты зданий и сооружений любой конфигурации с учетом всех видов нелинейностей на сложный комплекс нагрузок, который возникает при воздействии воздушной ударной волны на здание с учетом разрушения вышестоящих конструкций и формированием завала на покрытие подземного сооружения. Использование данной методики позволяет выполнить расчет с учетом возможных повреждений покрытия над встроенным подземным сооружением на момент образования на нем завала от разрушенных конструкций вышестоящего здания.

8. На всех стадиях выполненных исследований, анализируя полученные данные, а также результаты, полученные другими исследователями, отмечается, что взрывные воздействия являются выраженными случайными процессами и обладают значительной изменчивостью параметров. Поэтому при выполнении расчетов для более адекватной оценки надежности строительных конструкций подверженных воздействиям воздушной ударной волны следует применять методы теории надежности строительных конструкций. Проанализирован случайный характер взрывного воздействия и отмечено, что случайными параметрами взрыва могут быть приняты эффективная масса заряда и расстояние от центра взрыва. В работе выполнена оценка надежности отдельно стоящей стены, а также выполнена оценка надежности покрытия встроенного подземного сооружения при воздействии на него нагрузок от ударных волн и завала.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

В качестве рекомендаций и перспектив дальнейшей разработки темы можно выделить ряд задач, связанных с исследованием различных конструктивных схем сооружений с определением наиболее устойчивых систем, способных воспринимать значительные нагрузки при воздействии воздушной ударной волны, в том числе, и при дефлаграционном характере воздействия.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий:

1. *Мкртычев О.В., Новожилов Ю.В., Савенков А.Ю.* Воздействие тяжелого предмета на подземное сооружение при падении на поверхность грунта // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2021. Т. 17. № 4. С. 425–438. DOI 10.22363/1815-5235-2021-17-4-425-438

2. *Мкртычев О.В., Савенков А.Ю.* Методы моделирования фронта воздушной ударной волны для расчета промышленного сооружения // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. Вып. 2. С. 223–234. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.223-234

3. *Мкртычев О.В., Савенков А.Ю.* Численное моделирование фронта воздушной ударной волны при взрыве в воздухе и над землей в программном комплексе LS-DYNA // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2018. Т. 14. № 6. С. 467–474. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-6-467-474.

4. *Савенков А.Ю., Мкртычев О.В.* Нелинейный расчет железобетонного сооружения на воздействие воздушной ударной волны // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. Вып. 1. С. 33–45. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.1.33-45

5. Mkrtychev, O. V. Modelling of Blast Effects on Underground Structure / O. V. Mkrtychev, A. Y. Savenkov // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2019. – Vol. 15. – № 4. – Pp. 111-122. – DOI 10.22337/2587-9618-2019-15-4-111-122.

Статьи, опубликованные в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus:

6. Mkrtychev, O. Reliability of building structures in case of an air blast wave / O. Mkrtychev, A. Savenkov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 869. – №5. – Pp. 052054. – DOI: 10.1088/1757-899X/869/5/052054.

Статьи, опубликованные в других научных журналах и изданиях:

7. *Мкртычев О.В., Савенков А.Ю.* Газодинамический подход к расчету подземного сооружения на воздействие воздушной ударной волны // *Жилищное строительство*. 2022. № 12. С. 8–14. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2022-12-8-14>

8. *Мкртычев О.В., Савенков А.Ю.* Нелинейный расчет встроенного подземного сооружения на воздействие воздушной ударной волны с учетом обрушения надземной части // *Инженерный вестник Дона*, 2023, № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2023/8133

9. *Мкртычев О.В., Савенков А.Ю.* Надежность встроенного подземного сооружения при воздействии воздушной ударной волны // *Жилищное строительство*. 2023. № 1-2. С. 71-74. <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-1-2-71-74>