

Совершенствование методологии расчета защиты конструкций сооружений жилого типа от взрывных воздействий БПЛА

М.С. Василян, Е.С. Кашина

Волгоградский государственный технический университет

Волгоград

Аннотация: Исследование посвящено совершенствованию методологии расчёта конструкций на воздействие взрывных нагрузок, включая воздушные ударные волны при атаках БПЛА. Проанализированы современные методы моделирования, предложен алгоритм расчёта с использованием нелинейных динамических подходов. Показано, что применение сферических дискретных элементов позволяет точнее оценить разрушения и формирование завалов. Представленные расчёты подтверждают эффективность предложенного подхода.

Ключевые слова: взрывные нагрузки, воздушная ударная волна, беспилотные летательные аппараты, динамический расчёт, разрушение конструкций, моделирование взрывных воздействий, применение сферических дискретных элементов, алгоритм расчёта, формирование завалов, нелинейные методы.

Влияние взрывных нагрузок становится одним из ключевых факторов, требующих особого внимания при расчёте зданий. Ранее данный аспект был приоритетным лишь для стратегически значимых объектов, однако современные угрозы, включая атаки беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), требуют пересмотра подходов и для стандартных сооружений, включая жилые дома.

Согласно данным, представленным в исследовании [1], авторы утверждают, что БПЛА способны наносить удары по наземным целям, используя различные типы боевой нагрузки, включая осколочно-фугасные, термобарические и управляемые авиационные боеприпасы. Последствия взрыва БПЛА можно классифицировать на три основные категории: механические повреждения конструкций, вызванные ударной волной; разрушения, вызванные непосредственным взрывом и разлётом поражающих элементов; а также вторичные эффекты, такие, как пожары и обрушение несущих элементов зданий.

Влияние воздушной ударной волны на здания и сооружения определяется несколькими параметрами: избыточным давлением, импульсом давления, временем действия ударной нагрузки и её распределением по поверхности конструкций. По оценкам специалистов, средняя ударная волна от взрыва боевого БПЛА может создавать избыточное давление до 50-150 кПа, что сопоставимо с разрушительным воздействием промышленных аварий и мощных детонаций.

Статистические данные подтверждают, что за последний год атаки БПЛА привели к значительному росту числа разрушений и повреждений инфраструктуры. В частности:

- Август 2023 года – массовая атака дронов по семи регионам России, включая Псковскую область, где был нанесён удар по военно-гражданскому аэродрому.
- Январь 2025 года – одна из крупнейших атак, зафиксированных на территории России: одновременно было уничтожено 121 БПЛА над 13 регионами, включая Московскую, Брянскую и Курскую области.

Данные, представленные в статье [2], за период 2024–2025 годов, структурированы и приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Статистические данные атак БПЛА за 2023-2025 гг. [2]

Период	Количество атак	Основные регионы	Тип разрушений
1	2	3	4
2023, 1 полугодие	120	Московская, Брянская, Белгородская, Курская	Незначительные повреждения зданий, выбиты окна
2023, 2 полугодие	180	Ростовская, Крым, Саратовская, Орловская	Серьезные повреждения инфраструктуры, пожары
2024, 1 полугодие	95	Тульская, Липецкая, Орловская, Воронежская	Частичные разрушения жилых домов, повреждения фасадов

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
2024, 2 полугодие	116	Брянская, Калужская, Севастополь, Московская	Разрушения промышленных объектов, взрывы
2025, 1 полугодие	121	Брянская, Рязанская, Курская, Саратовская	Огромные разрушения, удары по критической инфраструктуре

На графике ниже можно наглядно увидеть соотношение общего количества атак БПЛА и случаев нанесения критического ущерба сооружениям.

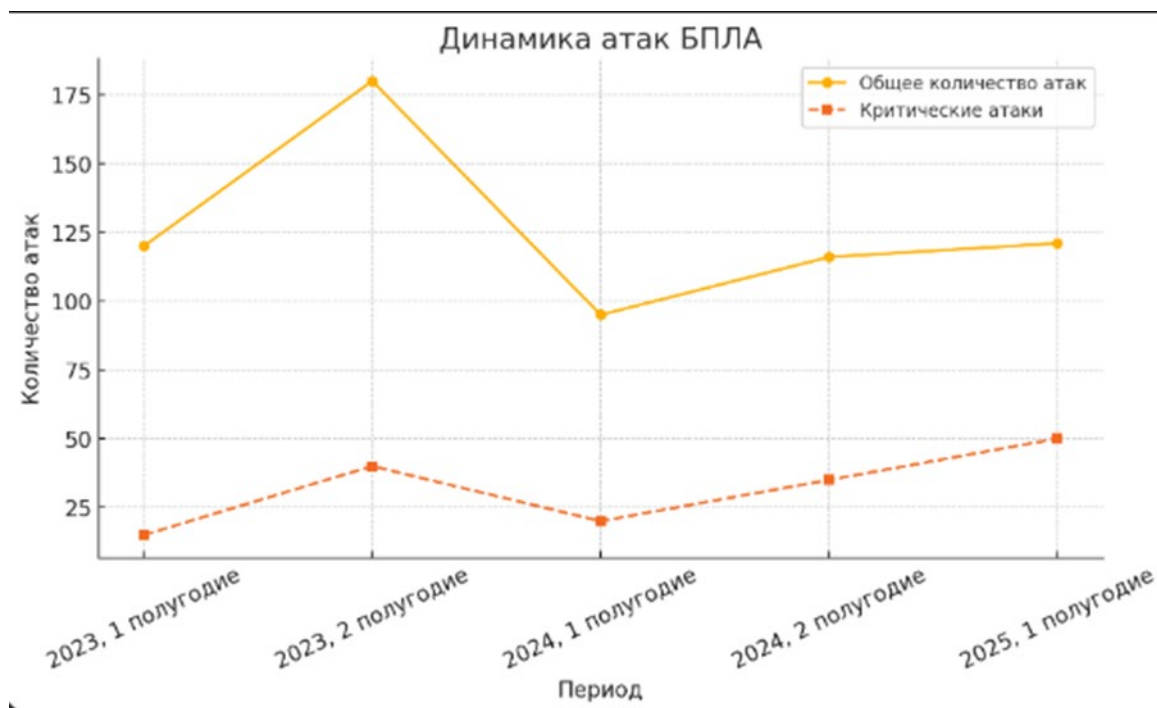


Рис. 1. График динамики атак БПЛА [2]

Учитывая острую важность решения проблемы защиты сооружений от атак беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ) инициировал разработку нового свода правил. В результате, 26 января 2025 года был введен в действие СП 542.1325800.2024 "Защитные ограждающие конструкции от беспилотных летательных аппаратов. Правила

проектирования". Документ регламентирует основные требования к проектированию и эксплуатации защитных ограждающих конструкций (ЗОК), обеспечивающих снижение последствий ударных нагрузок, вызванных взрывами боезарядов дронов, и минимизацию разрушений зданий и сооружений.

ЗОК представляют собой инженерные барьерные системы, предназначенные для защиты различных объектов – от жилых зданий до стратегических промышленных и военных объектов. Основное назначение таких конструкций заключается в поглощении кинетической энергии взрывной волны, осколков и разрушенных элементов здания, а также в снижении радиуса поражения от детонации. В соответствии с СП 542.1325800.2024, ЗОК должны учитывать три основных сценария воздействия: фронтальный удар взрывной волны, разлёт поражающих элементов и термическое воздействие.

Конструктивные решения ЗОК включают в себя различные схемы размещения защитных элементов, зависящие от типа здания и его расположения. Наиболее распространёнными вариантами являются периметральные барьеры, представляющие собой экранирующие бетонные или композитные панели, установленные на определённом расстоянии от основного здания, фасадные защитные экраны, интегрированные в конструкцию несущих стен для рассеивания ударной волны, а также подземные и полуподземные укрытия, предназначенные для локализации взрывного воздействия. Проектирование этих конструкций требует строгого соответствия расчётным нагрузкам, а материалы, используемые при их возведении, должны обладать высокой взрывостойкостью и способностью к деформационному поглощению энергии.

Свод правил также определяет принципы выбора строительных материалов, подлежащих использованию при создании ЗОК, с учётом их

устойчивости к динамическим нагрузкам и термическим эффектам взрыва. Особое внимание уделяется порядку эксплуатации защитных систем, включая регулярные проверки и оценку их эффективности. Включение подобных конструктивных решений в проекты жилых зданий позволяет значительно повысить их безопасность в условиях возрастающих угроз, связанных с применением БПЛА.

Несмотря на значительные преимущества защитных ограждающих конструкций, их применение сталкивается с рядом ограничений. Одним из ключевых недостатков является необходимость дополнительного пространства для размещения таких систем, что делает их реализацию в условиях плотной городской застройки затруднительной или даже невозможной. Кроме того, строительство ЗОК требует значительных материальных и временных затрат, что сдерживает их широкомасштабное внедрение, особенно в существующей жилой застройке. В связи с этим, целесообразным направлением исследований является анализ перспектив применения усиленных строительных материалов, способных выдерживать воздействие ударной волны без необходимости значительных изменений в конфигурации здания. Помимо этого, актуальным остаётся поиск путей совершенствования существующих алгоритмов расчёта, а также разработка новых технологических решений, позволяющих интегрировать защитные меры в уже существующие конструкции.

Подходы к совершенствованию методологии расчёта конструкций на взрывные нагрузки представлены в исследовании Чернухи Н.А. [3]. Автор рассматривает особенности анализа ударного воздействия на строительные сооружения в среде SCAD, уделяя особое внимание методам расчёта распределения нагрузок в элементах зданий. В работе подчёркивается, что традиционные упрощённые модели, используемые при проектировании, часто не отражают реальной картины деформации конструкций при взрывных

воздействиях, что может приводить к занижению расчётных нагрузок и недооценке повреждений. Одним из важных аспектов является учёт динамических характеристик строительных материалов, поскольку их поведение под воздействием кратковременных, но экстремальных нагрузок существенно отличается от работы при статических нагрузках. Включение в расчёты параметров нестационарного воздействия позволяет более точно моделировать процессы разрушения и деформации, что особенно важно при проектировании зданий, подверженных угрозе ударных волн.

С развитием технологий появилась возможность использования более точных и оперативных методов оценки разрушений. В исследовании Hryhorovskiy [4] рассматривается применение ВІМ для экстренной оценки устойчивости многопанельных зданий, поврежденных военными действиями. В качестве примера авторами рассмотрен случай газового взрыва в Киеве в 2020 году, где с помощью ВІМ была выполнена оценка деформаций здания, что позволило оперативно принять решение о стабилизации конструкций.

Дополнительно к вопросам расчёта отдельных элементов зданий важным аспектом является моделирование поведения всей конструкции в целом, особенно в случае воздействия мощных взрывных нагрузок. В этом контексте работа Савенкова и Мкртычева [5] представляет собой детальный анализ нелинейных расчётов железобетонных сооружений, подвергающихся воздействию воздушной ударной волны. Авторы рассматривают возможность прогрессирующего обрушения конструкций, возникающего в результате неравномерного распределения нагрузок после взрыва, что делает данный аспект критически важным при проектировании защитных систем. В отличие от традиционных подходов, в данной работе предложены методы расчёта с учётом пластических деформаций материалов, что позволяет получить более реалистичную оценку поведения конструкций в аварийных ситуациях. Особое внимание уделяется влиянию соединительных узлов и несущих элементов,

поскольку разрушение даже одного из них может привести к каскадному эффекту разрушений, что неоднократно наблюдалось в реальных условиях.

Понимание вероятностных характеристик разрушения конструкций также является важным элементом в разработке современных алгоритмов расчёта. В этом контексте работа Гостинина, Вирясова и Семёновой [6] предоставляет ценный материал по анализу аварийных ситуаций на магистральных газопроводах, которые, несмотря на свою специфику, имеют определённые параллели с воздействием взрывных нагрузок на здания. Авторы рассматривают механизмы разрушения трубопроводных систем, вызванные как внешними, так и внутренними воздействиями, и предлагают вероятностные методы оценки риска отказов. Такой подход может быть адаптирован к оценке устойчивости строительных конструкций, позволяя учитывать не только расчётные предельные нагрузки, но и статистическую вероятность их превышения при аварийных ситуациях. Включение таких методов в алгоритмы расчёта защитных конструкций могло бы значительно повысить точность прогнозирования их поведения, особенно в условиях непредсказуемых внешних воздействий.

Кроме того, исследование Мкртычева и Савенкова [7] фокусируется на нелинейном расчёте подземных сооружений с учётом обрушения надземных частей под воздействием ударной волны. В отличие от более ранних работ, в данном исследовании рассматривается комплексная модель, включающая процессы деформации окружающей среды, что особенно важно при расчёте защитных сооружений, расположенных вблизи жилой застройки. Одним из ключевых аспектов работы является анализ взаимодействия строительных конструкций с грунтом, который может значительно изменить характеристики распространения ударной волны и уменьшить её разрушающее воздействие.

Инженеры ЛИРА, во втором квартале 2024 года, опубликовали статью, в которой представлен порядок расчёта конструкций с учётом воздействия

воздушных ударных волн динамическим методом. Проанализировав данное руководство [8], можно выделить ключевые аспекты алгоритма подготовки расчётной модели и её анализа.

К достоинствам данного метода относятся возможность учитывать динамические эффекты взрыва с учетом временного воздействия ударной волны, применение метода конечных элементов (МКЭ) для моделирования распределения нагрузки по всей конструкции, учёт демпфирования, что особенно важно при анализе устойчивости зданий к повторным волновым воздействиям. Метод обеспечивает выполнение нелинейного анализа, что критически важно для оценки работы конструкций после предельного состояния.

Однако, как такового алгоритма, за исключением общих видов основных меню в статье не представлено, но по аналогии, предлагается к рассмотрению алгоритм, подходящий под этапность расчета, прописанную в статье, но с учетом результатов работы [7], где авторами указывается важность учёта данных внешней среды, а также, комплексного подхода при подготовке модели.

Таблица 2 – Доработанный алгоритм расчета конструкций сооружения на воздействие воздушных ударных волн

Этап	Описание
Определение параметров взрыва	Учитываются масса заряда, расстояние до объекта, параметры ударной волны
Формирование расчётной схемы	Моделирование элементов здания с учетом характеристик материалов
Задание статической нагрузки	Определение собственного веса конструкций и эксплуатационных нагрузок
Преобразование статических нагрузок в динамические	Применение динамических законов изменения нагрузки во времени
Проведение расчёта	Использование численных методов для анализа реакции конструкции
Оценка результатов	Анализ перемещений, ускорений, внутренних напряжений и разрушений

Установлено, что процесс взаимодействия воздушных ударных волн с конструкциями является сложным, а нормативные подходы и предлагаемые авторами решения [7,8] имеют значительные допущения, что не учитывает реальные процессы при моделировании взаимодействий. В связи с этим целесообразно использовать предложенный алгоритм расчёта, основанный на динамических методах моделирования [9].

Для моделирования разрушений строительных конструкций при использовании нелинейных динамических методов возможно применение трёх подходов [10]. В первом разрушенные элементы полностью исключаются из расчёта, что упрощает вычисления, но не позволяет учесть формирование завалов. Второй метод предполагает разрыв связей между элементами, оставляя их в модели с сохранением массы и кинематических параметров, что позволяет анализировать падение фрагментов на соседние конструкции. Однако он имеет недостатки, связанные с удвоением параметров разрушения. Третий метод основан на применении сферических дискретных элементов (Discrete Element Sphere - ПСД), которые адаптивно преобразуют разрушенные конструкции в частицы, наследующие физические свойства оригинальных элементов. Такой подход позволяет более точно моделировать формирование завалов и вторичных разрушений.

Анализируя вышеописанные методы, оптимальным представляется применение ПСД-элементов, что и было реализовано в дальнейшем моделировании. Разрушение надземной части и формирование завала исследовались на примере колонно-стеновой конструктивной системы многоэтажного здания [11]. В расчётную модель включены воздушная и грунтовая области с заданными параметрами воздействия ударной волны: избыточное давление во фронте составляло 100 кПа, а время фазы сжатия — 0,25 с. Внутри областей располагалось четырёхэтажное здание с одноэтажной подземной частью.

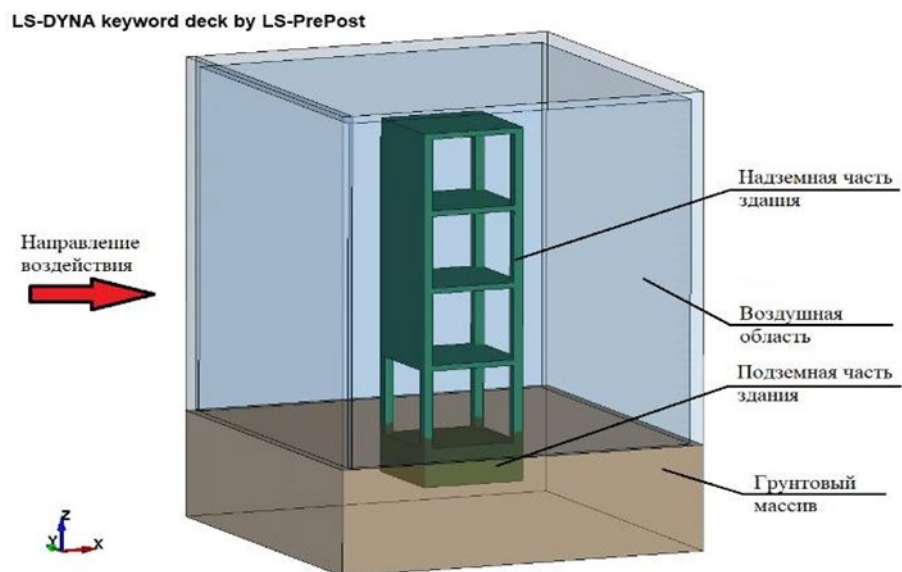


Рис. 2. Расчётная модель здания

Результаты моделирования показывают, что ударная волна распространяется неравномерно, что приводит к разному характеру разрушения элементов здания. Первоначальный импульс ударной волны оказывает наибольшее воздействие на фронтальную стену, вызывая её прогрессирующее разрушение. Боковые стены и кровля подвергаются давлению обтекания, которое формирует зоны локальных деформаций.

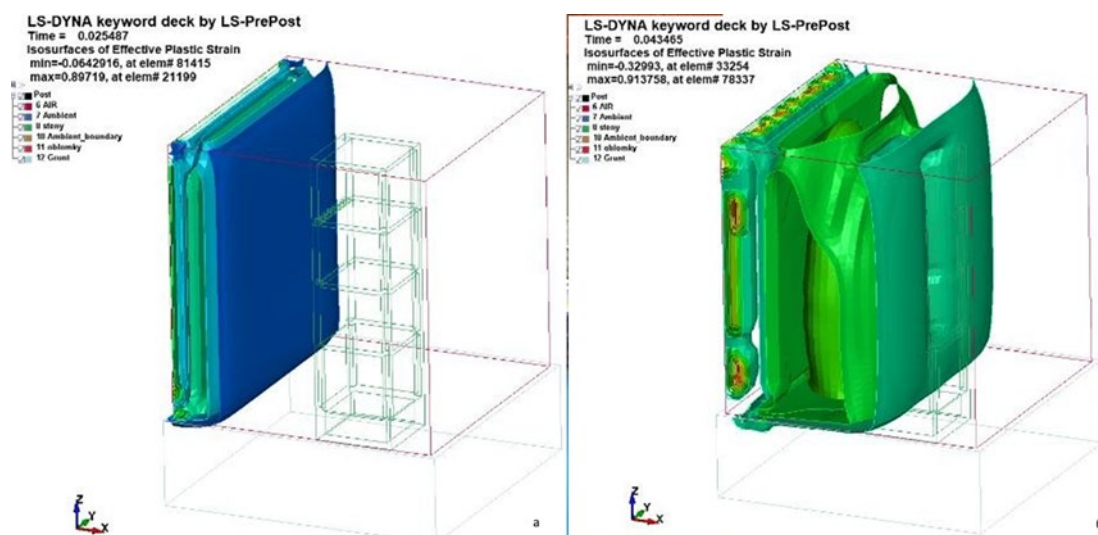


Рис. 3. Процесс воздействия на здание

а) фронт волны на входе в расчётную область, б) процесс обтекания здания воздушной ударной волной

По мере распространения волны вглубь расчётной области наблюдается её взаимодействие с грунтом, что приводит к дополнительным нагрузкам на подземную часть здания.

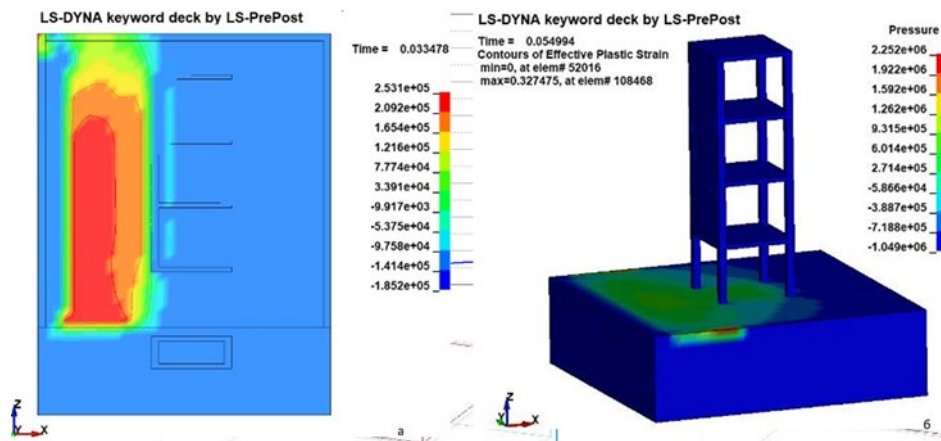


Рис. 4. Давление во фронте ударной волны

а) воздействие на фронтальную стену, б) распространение волны в грунте

Образование завала происходит после прохождения ударной волны сквозь здание, когда разрушенные элементы под действием гравитации оседают на покрытие подземного сооружения.

Расчёты показывают, что площадь завала превышает площадь покрытия в 1,5-2 раза, что указывает на необходимость учёта этих нагрузок при проектировании соседних подземных сооружений и коммуникаций.

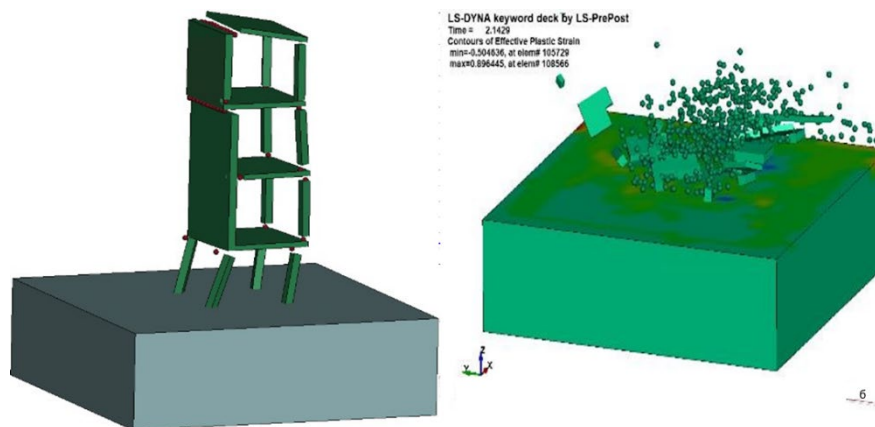


Рис. 5. Процесс разрушения здания и образование завала на покрытии подземного сооружения

а) момент разрушения, б) конечное состояние

Анализ перемещений разрушившихся элементов, а также оценка давления на покрытие подземной части подтверждают, что наиболее значительные разрушения приходятся на момент окончания воздействия воздушной ударной волны.

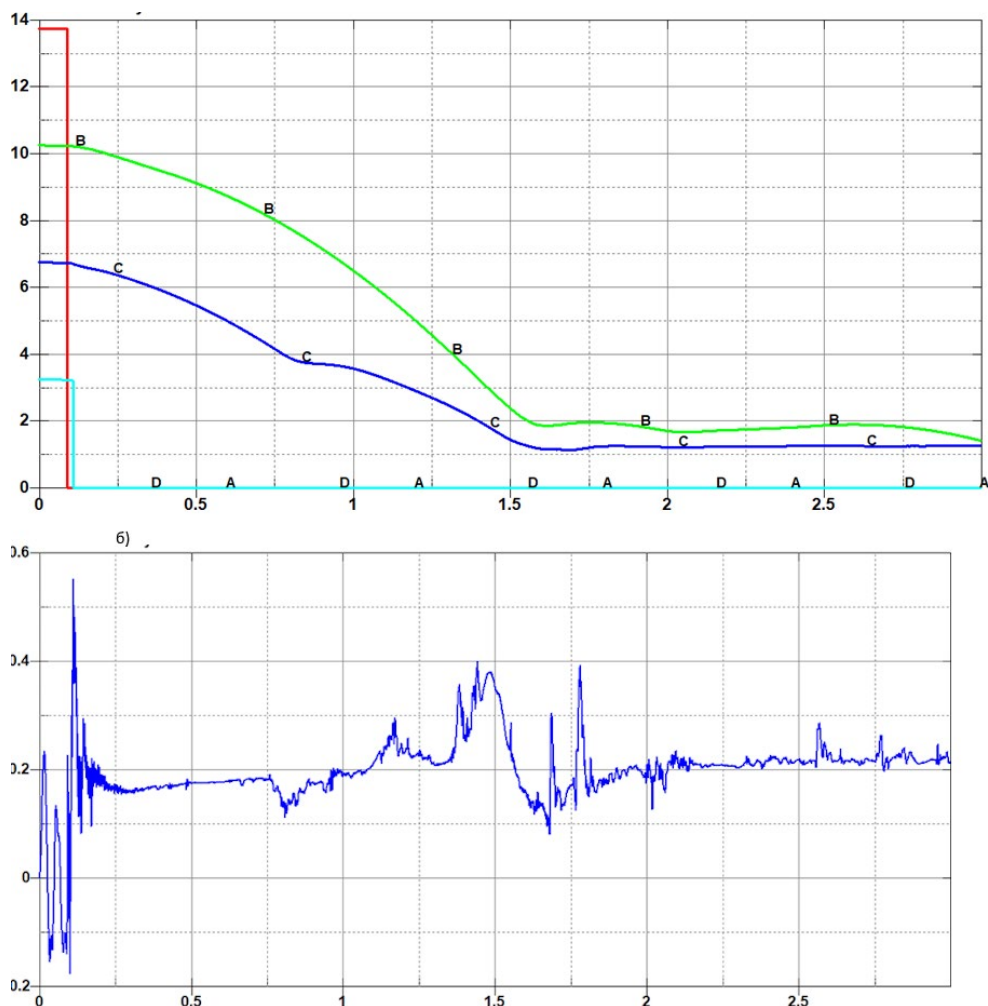


Рис. 6. Графики перемещения разрушившихся элементов
а) в покрытии, б) в перекрытии над 3-м этажом, в) в перекрытии над 2-м этажом, г) в перекрытии над 1-м этажом

Полученные результаты показывают, что площадь завала превышает площадь покрытия подземной части в 1,5-2 раза, что указывает на необходимость учёта этих нагрузок при проектировании соседних объектов.

Проведённое моделирование подтвердило необходимость комплексного подхода к расчёту защитных сооружений. Использование ПСД

элементов позволило точнее воспроизвести процесс обрушения, учесть вторичные нагрузки и влияние завалов на конструкцию. Анализ результатов доказал эффективность предложенного алгоритма (Таблица 2), обеспечивающего более точное прогнозирование разрушений по сравнению с упрощёнными статическими моделями. Такой подход позволяет учитывать перераспределение нагрузок, динамику разрушений и корректно определять зоны, требующие усиления, что критически важно для повышения устойчивости зданий к взрывным воздействиям, а также выполнять расчёты подземных сооружений с наиболее полной постановкой задачи, охватывающей весь спектр нагрузок и воздействий, вызванных воздушной ударной волной.

Литература

1. Малышев В.А., Митрофанов Д.В. Анализ боевых возможностей беспилотных летательных аппаратов по поражению наземных целей и порядок их применения // Воздушно-космические силы: теория и практика. – 2024. – № 29. – С. 21-25.
 2. РБК. Количество атак БПЛА на территории России за последние два года // URL: rbc.ru/politics/24/01/2025/679314af9a7947ceae92c608
 3. Чернуха Н.А. Особенности расчета сооружений на взрывные воздействия в среде SCAD // Инженерно-строительный журнал. – 2014. – №1. – С. 12-14.
 4. Hryhorovskiy, P., Osadcha, I., Jurelionis, A., Basanskyi, V., & Hryhorovskiy, A. (2022). A BIM-Based Method for Structural Stability Assessment and Emergency Repairs of Large-Panel Buildings Damaged by Military Actions and Explosions: Evidence from Ukraine. *Buildings*, 12(11), 1817.
 5. Савенков А.Ю., Мкртычев О.В. Нелинейный расчет железобетонного сооружения на воздействие воздушной ударной волны // Вестник МГСУ. – 2019. – Том 14, выпуск 1. – С. 33-45.
-

6. Гостинин И.А., Вирясов А.Н., Семенова М.А. Анализ аварийных ситуаций на линейной части магистральных газопроводов // Инженерный вестник Дона. – 2023. – №30. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2023/1618.
7. 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.
8. Ромашкина М. Расчет здания на воздействие воздушной ударной волны прямым динамическим методом с использованием ЛИРА-САПР // Официальный сайт ЛИРА-САПР. – 2024. – URL: help.liraland.com/ru-ru/high-technology-innovations/explosion-analysis.html#comments
9. Келасьев Н.Г., Авдеев К.В., Левин Д.И. О расчете производственных зданий на аварийные воздействия от внешнего взрыва // Промышленное и гражданское строительство. – 2022. – № 3. – С. 4-7. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.03.04-07.
10. Савенков А.Ю. Расчет подземных железобетонных сооружений на аварийные воздействия в нелинейной динамической постановке: дис. ... канд. техн. наук / Науч. рук. Мкртычев О.В. – Москва: НИУ МГСУ, 2023 – С. 22
11. Kang H., Joung J., Kim J., Kang J., Cho Y.S. Protect Your Sky: A Survey of Counter Unmanned Aerial Vehicle Systems. IEEE Access. 2020; 8:168671-168685. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3023473

References

1. Malishev V.A., Mitrofanov D.V. Vozdushno-kosmicheskie sily: teoriya i praktika, 2024. № 29. Pp. 21-25.
 2. RBK. Kolichestvo atak BPLA na territorii Rossii za poslednie dva goda [the number of UAV attacks in Russia over the past two years]. URL: rbc.ru/politics/24/01/2025/679314af9a7947ceae92c608
-

3. Chernukha N.A. Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal, 2014. №1. Pp. 12-14.
4. Hryhorovskiy, P., Osadcha, I., Jurelionis, A., Basanskyi, V., & Hryhorovskiy, A. (2022). A BIM-Based Method for Structural Stability Assessment and Emergency Repairs of Large-Panel Buildings Damaged by Military Actions and Explosions: Evidence from Ukraine. Buildings, 12(11), 1817.
5. Savenkov A.Yu., Mkrlichev O.V. Vestnik MGSU, 2019. Tom 14, vypusk 1. Pp. 33-45.
6. Gostinin I.A., Viryasov A.N., Semenova M.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023. №30. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2023/1618.
7. Mkrlichev O.V., Savenkov A.Yu. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2023/8133.
8. Romashkina M. Ofitsial'nyj sayt LIRA-SAPR. [Official LIRA-CAD website] 2024. URL: help.liraland.com/ru-ru/high-technology-innovations/explosion-analysis.html#comments.
9. Kelashev N.G., Avdeev K.V., Levin D.I. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering], 2022. № 3. Pp. 4-7. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.03.04-07.
10. Savenkov A.Yu. Raschet podzemnykh zhelezobetonnykh sooruzhenij na avarijnye vozdejstviya v nelinejnoj dinamicheskoj postanovke [Calculation of underground reinforced concrete structures for emergency impacts in a nonlinear dynamic formulation]: dis. ... kand. tekhn. Nauk. Nauch. ruk. Mkrlichev O.V. Moskva: NIU MGSU, 2023. Pp. 22
11. Kang H., Joung J., Kim J., Kang J., Cho Y.S. Protect Your Sky: A Survey of Counter Unmanned Aerial Vehicle Systems. IEEE Access. 2020; 8:168671-168685. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3023473

Дата поступления: 14.01.2025

Дата публикации: 25.02.2025