

Анализ влияния атак БПЛА на прочность железобетонных конструкций

Е.С. Мельникова, В.В. Габова, А.А. Чураков, В.В. Дроздов

Волгоградский государственный технический университет

Аннотация: В данной работе проведен анализ результатов расчета, который позволяет оценить реальное влияние от ударного и взрывного воздействия от БПЛА на прочность железобетонных конструкций. Установлены предельные величины нагрузок, в зависимости от четырех наиболее распространенных типов стен. Ранее опубликованная разработанная классификация позволила выявить основные параметры, необходимые для детального расчета нагрузок.

Ключевые слова: предельные нагрузки, взрыв, самонесущие стены, армированные стены, неармированные стены, несущие стены, БПЛА, проверка прочности, строительные конструкции, ударные волны.

Нагрузки от взрывных воздействий на строительные конструкции на текущий момент требует особого внимания, в том числе, на этапе проектирования новых зданий и сооружений.

Ранее, данное направление в научной области было рассмотрено исключительно в качестве объектов для стратегически значимых сооружений, однако ситуация в мире на 2025-й год требует детального изучения данного вопроса, ввиду острой необходимости в обеспечении людей, действительно безопасными конструкциями, способными воспринять нагрузку от взрывного воздействия и не получить критических повреждений.

Согласно данным [1] БПЛА наносят удары по наземным целям различными типами нагрузок. Это могут быть и удары осколочно-фугасными зарядами, и управляемые авиационные боеприпасы, что позволяет, как уже было указано в работе [2] по разработанной классификации распределения на три основные категории, а именно: на незначительные повреждения, вызванные ударной воздушной волной, механические повреждения элементов ввиду столкновения, и разрушения взрывом, наносящих самые критические повреждения.

Анализ последних статистических данных [3] подтверждает рост разрушительных последствий атак беспилотных летательных аппаратов, что

делает разработку эффективных защитных решений приоритетной задачей. Если в 2023 году удары дронов носили эпизодический характер и вызывали в основном локальные повреждения зданий, то уже к 2025 году атаки приобрели системный масштаб, затрагивая объекты критической инфраструктуры и нанося серьезный ущерб.

Особенно резонансными стали события августа 2023 года, когда массовая атака охватила семь регионов России, включая Псковскую область, где был нанесен удар по военно-гражданскому аэродрому.

В январе 2025 года фиксируется крупнейшая атака за весь период наблюдений: одновременно уничтожено 121 БПЛА, нанесших удары по 13 регионам, включая Московскую, Брянскую и Курскую области.

В таблице 1 представлены данные о динамике атак, количестве пораженных регионов и характере разрушений.

Таблица № 1

Анализ статистики за последние два года [3]

Период	2023, I	2023, II	2024, I	2024, II	2025, I
Количество атак	120	180	95	116	121
Основные регионы	Московская, Брянская, Белгородская, Курская	Ростовская, Крым, Саратовская, Орловская	Тульская, Липецкая, Орловская, Воронежская	Брянская, Калужская, Севастополь, Московская	Брянская, Рязанская, Курская, Саратовская
Характер разрушений	Повреждение фасадов, выбиты окна	Пожары, частичные разрушения зданий	Деформации несущих конструкций, разрушение элементов фасадов	Взрывы, разрушение промышленных объектов	Разрушение критически важных объектов

Систематизация информации позволяет выделить эволюцию тактики применения БПЛА: от единичных случаев повреждения фасадов и окон в первой половине 2023 года до ударов по промышленным объектам и критически важной инфраструктуре к 2025 году.

В данной статье проводится анализ и решения именно по последнему типу, по нагрузкам от взрыва.

Нарастающая угроза потребовала пересмотра подходов к защите зданий и инфраструктуры. В связи с этим 26 января 2025 года Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ) утвердил СП 542.1325800.2024 «Защитные ограждающие конструкции от беспилотных летательных аппаратов. Правила проектирования». Данный свод правил регламентирует принципы проектирования и эксплуатации защитных конструкций, позволяющих минимизировать разрушения, вызванные ударными нагрузками от взрывов боезарядов дронов, и повысить устойчивость зданий к новым видам угроз.

Защитные ограждающие конструкции (ЗОК) представляют собой инженерные системы, предназначенные для минимизации последствий взрывных воздействий и защиты различных объектов – от жилых зданий до стратегических промышленных комплексов.

Их основная функция заключается в снижении кинетической энергии ударной волны, осколков и разрушенных элементов, а также в локализации зоны поражения [1]. Согласно СП 542.1325800.2024, в расчетах ЗОК учитываются три сценария: воздействие фронтальной взрывной волны, разлёт поражающих элементов и термическое воздействие.

Конструктивные решения ЗОК варьируются в зависимости от типа объекта и его расположения. Среди наиболее распространённых – периметральные ограждения из бетонных или композитных панелей, экранирующие фасадные системы и подземные укрытия.

Проектирование таких конструкций требует точных расчетов нагрузок и применения взрывостойких материалов с высокой способностью к деформационному поглощению энергии [2]. Включение данных решений в архитектуру жилых зданий значительно повышает их устойчивость к угрозам, связанным с атаками БПЛА, минимизируя риск разрушения и увеличивая время реакции системы на воздействия.

При этом широкое внедрение ЗОК сталкивается с рядом сложностей. Основные ограничения связаны с необходимостью дополнительного пространства, что усложняет их размещение в условиях плотной застройки. Также реализация данных систем требует значительных временных и финансовых затрат, что затрудняет их массовое использование [3]. В связи с этим перспективным направлением является разработка усиленных строительных материалов, способных выдерживать ударную волну без изменения конфигурации здания.

Совершенствование методов расчёта также играет ключевую роль, особенно в моделировании поведения конструкций при кратковременных экстремальных нагрузках. Современные алгоритмы анализа воздействия взрывных нагрузок предлагают более точные методы оценки. В исследовании [4] рассматриваются возможности моделирования ударных воздействий в среде SCAD. Автор подчёркивает, что традиционные модели занижают расчетные нагрузки, не учитывая динамические характеристики строительных материалов.

Включение параметров нестационарного воздействия позволяет более точно прогнозировать разрушения и повысить надежность проектных решений.

Дополнительное внимание уделяется цифровым технологиям в оценке устойчивости зданий. В статье [5] анализируется применение BIM для быстрой диагностики повреждений конструкций. На примере газового взрыва в Киеве в 2020 году показано, что использование BIM-моделирования позволило оперативно оценить деформации здания и принять необходимые меры по его стабилизации. Особую актуальность приобретают исследования, посвящённые нелинейным расчетам.

В работе [6] рассматриваются механизмы прогрессирующего обрушения конструкций под воздействием воздушной ударной волны.

Авторы предлагают подход, учитывающий пластические деформации и влияние разрушения несущих элементов на устойчивость всей системы. В исследовании [7] анализируются вероятностные методы оценки аварийных ситуаций на трубопроводах, что может быть адаптировано для прогнозирования разрушений зданий при взрывных воздействиях.

Подземные конструкции требуют особого подхода к моделированию. В работе [8] исследуются взаимодействия строительных объектов с грунтом, что позволяет учитывать демпфирование ударной волны и минимизировать её разрушительное воздействие. Использование таких подходов особенно важно в условиях плотной застройки, где невозможно возводить масштабные защитные сооружения.

На основании анализа литературы, а также в соответствии с разработанной классификацией [9,10], был проведен расчет конструкций несущих армированных стен, несущих неармированных стен, самонесущих армированных стен и самонесущих неармированных стен.

Для проведения расчетов были заданы следующие параметры, приведенные в таблице 2:

- Геометрические характеристики стен, высоты, толщины и длины;
- Материал и его характеристики, прочность бетона, процент армирования, модуль упругости;
- Динамические характеристики ударной волны, включая импульс давления, продолжительность волны;
- Заданы граничные условия, в виде распределения нагрузки, узлов опор, степени заделки.

Расчет проводился с применением динамических коэффициентов, учитывающих влияние взрывной волны, а также нормативных формул [10-12] для определения изгибающих моментов, прогибов и напряжений в конструкциях.

Избыточное давление ударной волны определялось по формуле:

$$P_{уд} = \frac{K_d W}{R^3} \quad (1)$$

где $P_{уд}$ – избыточное давление ударной волны, кПа; K_d – коэффициент демпфирования среды; W – эквивалентная масса взрывчатого вещества, кг; R – расстояние от эпицентра взрыва до объекта, м.

Прогиб стены рассчитывался с учетом динамического воздействия:

$$f_{max} = \frac{5ql^4}{384EI} \quad (2)$$

где f_{max} – максимальный прогиб, мм; E – модуль упругости материала, МПа; I – момент инерции сечения стены, м⁴.

Таблица № 2

Исходные данные для расчета

Параметр	Значение
Высота стены, м	3
Длина стены, м	4
Толщина стены, мм	250 (неарм.) / 300 (арм.)
Прочность бетона, МПа	25
Модуль упругости, МПа	30 000
Коэффициент демпфирования Кд	1,2
Избыточное давление, кПа	100
Импульс давления, кПа·с	0.25
Время воздействия, мс	10

В расчете применялись нормативные методы проектирования, основанные на учете динамических характеристик конструкций, таких как избыточное давление, импульс ударной волны, коэффициенты демпфирования и прочность материалов [13].

В качестве базы для расчетов использованы рекомендации СП 296.1325800.2017 «Здания и сооружения. Особые воздействия» и методические указания по проектированию зданий, подверженных воздействию взрывных нагрузок [14].

В расчетной схеме учитывались геометрические параметры стен, материал конструкции, коэффициент динамичности и свойства ударной волны.

Для моделирования применялись численные методы, включая расчет изгибающих моментов, прогибов и напряжений в стенах. Важное внимание уделялось определению критических нагрузок, при которых возможно разрушение конструкции, а также анализу степени деформации при различных уровнях ударного воздействия.

Теоретическая часть расчетов опиралась на принципы механики разрушения и динамической устойчивости конструкций. Для самонесущих стен оценивалось поведение конструкции при свободном прогибе под воздействием взрывной волны, в то время как для несущих стен учитывалось перераспределение нагрузок через элементы каркаса здания.

В основе расчетов лежала зависимость для определения изгибающего момента в середине высоты стены, которая достигает максимального значения в точке приложения нагрузки.

При расчете армированных стен принимались во внимание вклад продольной арматуры и её способность повышать предельную нагрузку конструкции. Арматура, размещенная в стенах, значительно повышает их прочностные характеристики, особенно на изгиб и сжатие [15].

Результаты расчетов отображены в таблице 3. Анализируя вычисления видно, что максимальный изгибающий момент для самонесущих неармированных стен составил 5,16 кН·м, а для самонесущих армированных стен – 7,51 кН·м. Для несущих неармированных стен величина момента составила 10,85 кН·м, а для несущих армированных – 14,32 кН·м. Прогиб стен варьировался в пределах от 5,2 мм до 14,8 мм, в зависимости от наличия арматуры и конструктивных характеристик.

Анализ показал, что армированные конструкции демонстрируют значительно большую устойчивость к взрывным нагрузкам по сравнению с неармированными стенами, что подтверждает необходимость их применения в условиях повышенной угрозы взрывных воздействий.

Результаты проведенных расчетов

Тип стены	Изгибающий момент (кН·м)	Прогиб (мм)
Самонесущая неармированная	5.16	5.2
Самонесущая армированная	7.51	7.5
Несущая неармированная	10.85	12.3
Несущая армированная	14.32	14.8

Литература

1. Садовский М.А. Избранные труды. Геофизика и физика взрыва. М.: Наука, 2004. 440 с.
2. Мельникова Е.С. Проектирование защитных ограждающих конструкций от атак БПЛА // XXIX Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области 16 сентября – 15 ноября 2024 года: Сборник материалов конференции. Волгоград. С. 219-220
3. РБК. Количество атак БПЛА на территории России за последние два года // URL: rbc.ru/politics/24/01/2025/679314af9a7947ceae92c608
4. Чернуха Н.А. Особенности расчета сооружений на взрывные воздействия в среде SCAD // Инженерно-строительный журнал. 2014. №1. С. 12-14.
5. Hryhorovskiy, P., Osadcha, I., Jurelionis, A., Basanskyi, V., Hryhorovskiy, A. 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. 2022. Vol. 12. Issue 11. No. 1817. DOI: 10.3390/buildings12111817
6. Савенков А.Ю., Мкртычев О.В. Нелинейный расчет железобетонного сооружения на воздействие воздушной ударной волны // Вестник МГСУ. 2019. Том 14, Вып. 1. С. 33-45.



7. Гостинин И.А., Вирясов А.Н., Семенова М.А. Анализ аварийных ситуаций на линейной части магистральных газопроводов // Инженерный вестник Дона. 2013. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2023/1618
 8. Иногамов И.И., Рахимова М.Х., Акбархонов С.К. Анализ и совершенствование воздействия взрывных процессов в карьерах на здания и сооружения // European Journal of Interdisciplinary Research and Development. 2023. Т. 16. С. 66-68
 9. 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: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2023/8133>.
 10. 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
 11. Тонких Г.П., Макарьин А.И., Сосунов И.В., Посохов Н.Н., Козача В.М. Совершенствование средств коллективной защиты населения в современных условиях // Технологии гражданской безопасности. 2016. Т.13, №4. С.68
 12. 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.
 13. 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. Pp. 168671-168685. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3023473
 14. Бирбраер А.Н., Роледер А.Ю. Экстремальные воздействия на сооружения. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2009. 594 с.
-

15. Карауш С.А. Оценка параметров промышленных взрывов // Томск: Изд-во ТГАСУ, 2014. 95с.

References

1. Sadovskij M.A. Izbrannye trudy. Geofizika i fizika vzryva [Selected works. Geophysics and physics of explosion.]. Moskva: Nauka, 2004. 440 p.
 2. Melnikova E.S. XXIX Regional'naja konferencija molodyh uchenyh i issledovatelej Volgogradskoj oblasti 16 sentjabrja – 15 nojabrja 2024 goda: Sbornik materialov konferencii (Proc. XXIX Regional Conference of Young Scientists and Researchers of the Volgograd Region September 16 – November 15, 2024: Conference proceedings). Volgograd, 2024, pp. 219-220
 3. 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
 4. Chernukha N.A. Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal, 2014. №1. pp. 12-14.
 5. Hryhorovskiy, P., Osadcha, I., Jurelionis, A., Basanskyi, V., Hryhorovskiy, A. 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. 2022. 12(11), 1817.
 6. Savenkov A.Yu., Mkrtychev O.V. Vestnik MGSU. 2019. Vol. 14. No 1. pp. 33-45
 7. Gostinin I.A., Viryasov A.N., Semenova M.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1618.
 8. Inogamov I.I., Rahimova M.H., Akbarhonov S.K. European Journal of Interdisciplinary Research and Development. 2023. Vol. 16. pp. 66-68
 9. Mkrtychev O.V., Savenkov A.Yu. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2023/8133.
-



10. Romashkina M. Ofitsial'nyj sajt LIRA-SAPR. [Official website of LIRA-CAD] 2024. URL: help.liraland.com/ru-ru/high-technology-innovations/explosionanalysis.html#comments.
11. Tonkih G.P., Makar'in A.I., Sosunov I.V., Posohov N.N., Kozacha V.M. Tehnologii grazhdanskoj bezopasnosti. 2016. Vol.13, No. 4. p.68
12. Kelasjev N.G., Avdeev K.V., Levin D.I. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering], 2022. No. 3. Pp. 4-7. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.03.04-07.
13. 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. Pp. 168671-168685. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3023473
14. Birbraer A.N., Roleder A.Ju. Jekstremal'nye vozdeystvija na sooruzhenija [Extreme impacts on structures]. Sankt-Peterburg: SPbPU. 2009. 594 p.
15. Karaush S.A. Ocenka parametrov promyshlennyh vzryvov [Evaluation of industrial explosion parameters]. Tomsk: TGASU. 2014. 95 p.

Дата поступления: 4.03.2025

Дата публикации: 25.04.2025