

Защитные вантовые конструкции: эффективность и перспективы противодействия БПЛА

Е.С. Мельникова¹, В.В. Габова¹, А.А. Чураков¹, И.В. Недожегина²

¹Волгоградский государственный технический университет

²Общество с ограниченной ответственностью «ПроТехИнжиниринг», Волгоград, Россия

Аннотация: Статья посвящена разработке и расчету вантовых конструкций, используемых в качестве защитных ограждений от беспилотных летательных аппаратов (далее БПЛА). Проведен анализ проектирования и расчета вантовых конструкций для защитных ограждающих конструкций, предназначенных для противодействия БПЛА. Рассмотрены основные этапы расчета, включая определение внешних нагрузок, динамическое моделирование ударных воздействий, нахождение коэффициента динамичности через потерю энергии, переход кинетической энергии в потенциальную. Обсуждаются перспективы развития данного направления с акцентом на модульность, адаптивность и интеграцию систем. Сделан вывод о вантовых конструкциях как о перспективном решении для защиты критически важных объектов, обеспечивая высокую прочность при минимальном весе и затратах.

Ключевые слова: вантовые конструкции, ударные воздействия, защитные ограждающие конструкции, беспилотные летательные аппараты, динамические нагрузки, коэффициент динамичности, энергия соударения, неупругий удар.

Защита объектов от беспилотных летательных аппаратов (далее БПЛА) обусловлена стремительным развитием технологий и широким распространением дронов, которые могут использоваться как в мирных, так и в враждебных целях. В связи с этим разработка эффективных защитных систем становится важной целью для обеспечения безопасности критически важных объектов, таких как промышленные предприятия, аэропорты, военные базы и жилые массивы.

Обзор состояния проблемы показывает, что существующие методы защиты от БПЛА включают радиоподавление, лазерные системы и физические барьеры [1,2]. Однако такие традиционные методы пассивной защиты, как железобетонные ограждения или сетчатые экраны, часто оказываются недостаточно эффективными. Это связано с отсутствием стандартизированных расчетных методик, использованием неоптимальных материалов и индивидуальным проектированием под каждый объект, что

увеличивает сроки реализации и снижает надежность [3]. Физические ограждения, в частности вантовые конструкции, остаются одним из наиболее надежных и экономически эффективных решений.

В современном мире вантовые конструкции становятся все более популярными в строительстве благодаря своим свойствам и уникальным преимуществам. Они представляют собой сооружение, основным элементом которых являются ванты – стальные тросы, работающие на растяжение. Однако, для успешного применения таких конструкций необходимо учитывать их требования к проектированию и расчету [4-6].

Несмотря на преимущества вантовых конструкций, таких как высокая прочность и надежность, возможность перекрывать большие пролеты и относительно небольшой вес, вопросы проектирования и расчета таких конструкций с учетом специфики воздействия БПЛА изучены недостаточно.

Особое внимание следует уделять анализу аварийных ситуаций, таких как обрыв одной или несколько вант. В таком случае важно понимать, как изменится распределение нагрузок по всей конструкции и какие дополнительные меры безопасности могут быть приняты [7].

Вантовые системы давно применяются в большепролетных сооружениях – от спортивных комплексов до висячих мостов – и хорошо изучены в контексте строительной механики [8-10]. Так, в [11] методы расчета гибких нитей включают анализ напряженно-деформированного состояния с использованием, как аналитических подходов, так и программных комплексов типа ЛИРА или SCAD. С другой стороны, их адаптация к задачам защиты от БПЛА требует пересмотра традиционных моделей.

Современные исследования [12-14], акцентируют внимание на необходимости учета нелинейных деформаций, вызванных взрывными нагрузками, и оптимизации геометрии конструкций для минимизации провисаний. СП 542.1325800.2024 «Защитные ограждающие конструкции от

беспилотных летательных аппаратов. Правила проектирования» стремится унифицировать требования к материалам, методам расчета и эксплуатации защитных ограждающих конструкций (далее ЗОК) [15]. Однако даже с учетом этих инициатив, практическая реализация вантовых систем в ЗОК требует дальнейших исследований, особенно в области моделирования комбинированных нагрузок (ветровых, температурных, ударных) и обеспечения ремонтпригодности конструкций.

Расчет вантовых конструкций для защитных ограждающих сооружений от БПЛА требует комплексного подхода, учитывающего множество факторов. Начинается процесс с определения всех возможных внешних воздействий на конструкцию. Это не только столкновения с беспилотными летательными аппаратами, но также и другие природные явления, такие как ветровые нагрузки, осадки, температурные колебания, а также собственный вес всей системы. Каждый из этих факторов может значительно повлиять на прочность и устойчивость вантовой сети, поэтому каждый тип нагрузки должен быть тщательно проанализирован для обеспечения надежности всей системы защиты [12].

Геометрический анализ включает в себя точное определение расположения опорных точек и методов крепления вант, что позволяет равномерно распределить нагрузку по всей поверхности защитной сети. Для достижения наиболее эффективного решения применяются различные методы анализа, включая метод конечных элементов, который помогает смоделировать поведение конструкции под действием различных нагрузок и предугадать возможные деформации или точки повышенного напряжения. Этот этап расчета особенно важен, так как именно правильная геометрия определяет способность конструкции выдерживать ударные нагрузки без критических повреждений [6,16].

Когда речь идет о расчете напряжений в вантах, необходимо использовать теорию растяжения и сжатия, принимая во внимание предел текучести выбранного материала, коэффициент безопасности и особенности динамических нагрузок. Для учета влияния ударных нагрузок, таких как столкновения с БПЛА, проводится специальный динамический анализ. Этот вид исследования включает моделирование ударных волн, изменение формы конструкции во времени и оценку последствий возможных деформаций. Особое внимание уделяется способности конструкции поглощать энергию удара без значительных повреждений, что является ключевым требованием для защитных систем данного типа. Такой подход позволяет не только обеспечить безопасность объекта, но и минимизировать затраты на обслуживание и ремонт после инцидентов [17].

В одной из работ была предложена расчетная схема ванта в виде модели «изогнутая линия» [11]. Согласно СП 524.1325800.2023 «Висячие покрытия» по схеме нагружения нитей принимаем цилиндрические на прямоугольном плане.

Исходя из этого, длина нити составит:

$$L \cong l[1 + 8/3(f/l)^2] \quad (1)$$

Усиление распора (горизонтальная составляющая опоры):

$$H = (g + p)l^2/(8f) \quad (2)$$

Прогиб для схемы нагружения цилиндрических нитей на прямоугольном плане при эффективном модуле упругости E_{ef} :

$$w = 3pl^4/[(128Eaf_0^2)(1 + C_1)], \text{ где } C_1 = 3gl^4/(128Eaf_0^3) \quad (3)$$

Прогиб под статической и динамической нагрузкой является важным параметром, который необходимо учитывать при проектировании любой конструкции, использующей тросовые системы. В то время как статический анализ позволяет получить основное понимание поведения конструкции под фиксированными нагрузками, динамический анализ предоставляет более

полное представление о последствиях временных изменений в воздействиях. Использование корректных моделей и расчетов для обеих ситуаций поможет повысить безопасность, долговечность и эффективность конструкций. Исходя из этого принимаем расчетную схему прогибов и длин троса (рис.1). Принятые допущения для данной схемы – трос не растягивается, опоры не перемещаются.

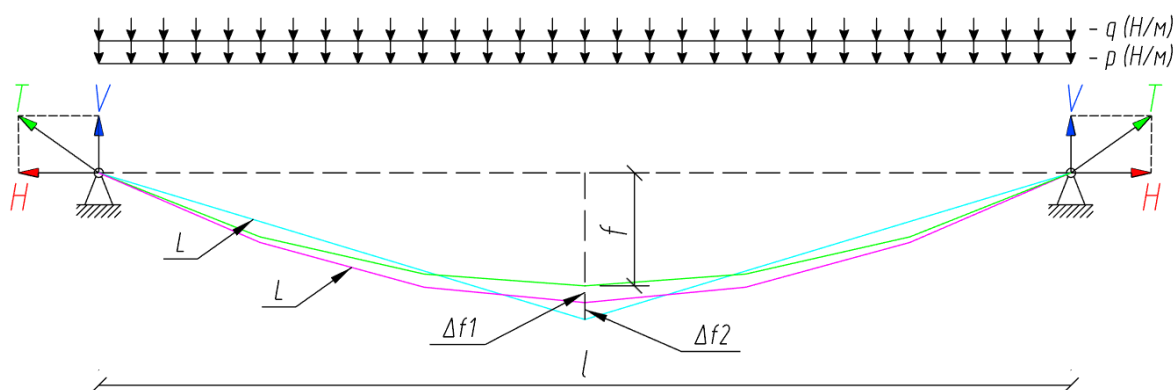


Рис. 1. Принятая расчетная схема прогибов и длин троса

l – пролет; L – длина троса; f – начальный провес троса; Δf_1 – прогиб от статической нагрузки; Δf_2 – прогиб от динамической нагрузки

Принятые допущения для данной схемы – трос не растягивается, опоры не перемещаются. Зная длину троса L , определяем прогибы с учетом провеса от динамической нагрузки Δf_2 как высоту треугольника. После преобразований получаем формулу для нахождения прогиба от динамической нагрузки:

$$\Delta f_2 = \frac{\sqrt{4L^2 - l^2}}{2} \quad (4)$$

Вертикальные и горизонтальные удары отличаются по характеру воздействия, однако оба типа динамических нагрузок требуют тщательного анализа в процессе проектирования и строительстве. Применение правильных методов расчета, учитывающих массу, скорость, угол и тип поверхности, позволяет заранее определить пределы прочности конструкций и гарантировать их безопасность в эксплуатации.

Современные конструкции должны учитывать возможность воздействия как вертикальных, так и горизонтальных ударов для обеспечения надежности, долговечности и эксплуатации в самых различных условиях. При горизонтальном ударе формула динамического коэффициента будет отличаться от вертикального удара (5), так как в этом случае происходит чисто динамический удар и будет отсутствовать работа, совершаемая силой P .

$$\Delta_{\partial} = \Delta_{cm} \cdot K_{\partial} \quad (5)$$

Статическая деформация, или статический прогиб δ_c , представляет собой величину, на которую объект деформируется под действием приложенных статических нагрузок. Этот показатель имеет важное значение для оценки прочности и устойчивости конструкции, особенно в тех случаях, когда на нее воздействуют удары или значительные нагрузки.

Приближенные формулы для вычисления в случае удара на двух опорах имеют такой вид:

$$f_{Dmax} = K_D f_{cmax} \sqrt{\frac{T_0}{U_c}} = \frac{Ql^3}{48EJ} \sqrt{\frac{96T_0EJ}{Q^2l^3}} = \sqrt{\frac{T_0l^3}{24EJ}} \quad (6)$$

$$\sigma_{Dmax} = K_D \sigma_{cmax} = \frac{Ql}{4W} \sqrt{\frac{96T_0EJ}{Q^2l^3}} = \sqrt{\frac{6T_0EJ}{W^2l}} \quad (7)$$

Энергия соударения является ключевым понятием в механике, особенно в области динамики. Она описывает количество энергии, передающееся или преобразующееся в процессе взаимодействия двух или более тел.

Для проектирования устойчивых вантовых конструкций важно учитывать при ударах, как энергия передается и преобразуется во время столкновения [18]. В данном контексте интерес представляет процесс перехода кинетической энергии, возникающей в момент удара, в потенциальную энергию, связанную с деформацией материалов, таких как тросы. Теорема Карно (8) гласит: неупругий удар происходит, когда два тела сталкиваются, и часть их кинетической энергии преобразуется в другие виды

энергии, что приводит к потере кинетической энергии в системе. Тем не менее, закон сохранения импульса продолжает действовать.

$$T_0 - T = \frac{m_1(V_1 - U)^2}{2} + \frac{m_2(V_2 - U)^2}{2} \quad (8)$$

Изгибная жесткость каната — это характеристика, определяющая его способность сопротивляться изгибу. Чем больше изгибная жесткость, тем меньшей будет деформация каната при приложении изгибающего момента. Условно принимая изгибную жесткость каната равную нулю, определяем поперечную силу, которую необходимо приложить к тросу так (рис.2), чтобы при известном натяжении N прогиб был равен f_{np} :

$$Q_k = \frac{4Nf_{np}}{l_\delta} \quad (9)$$

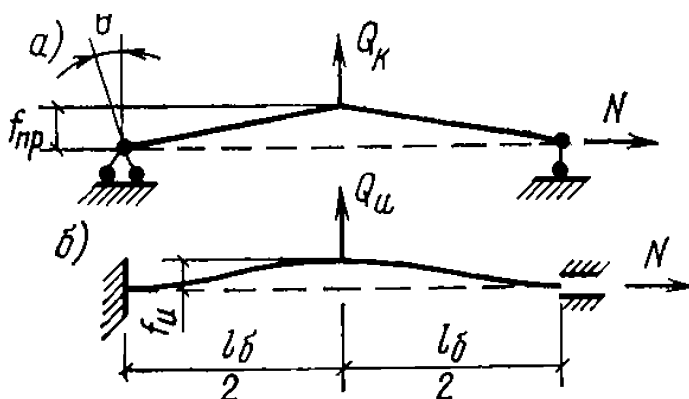


Рис. 2. Расчетная схема каната для определения поперечной силы

Для определения усилия в канате в процессе расчета вантовых конструкций необходимо учитывать статическое напряжение с учетом K_d . В случае, когда изгибная жесткость равна нулю, канат может воспринимать растяжение. Коэффициент динамичности в данном случае корректирует статическое усилие для расчета динамических нагрузок.

Динамические напряжения (10) и перемещения (5) при ударе определяются:

$$\sigma_\partial = K_d \cdot \sigma_{ст} \quad (10)$$

С использованием предложенных формул был произведен расчет вантовых конструкций. Для анализа были использованы различные модели, включающие как статические, так и динамические нагрузки, что позволило оценить поведение конструкции в различных условиях эксплуатации.

Согласно (рис.1) для нашего расчета принимаем пролет равный $l = 12 \text{ м}$

Использованы следующие исходные данные:

Диаметр $d = 0,015 \text{ м}$. Вант изготовлен из стали и представляет собой канат согласно ГОСТ 3064-80 «Канат одинарной сварки типа ТК конструкции 1х37 (1+6+12+18). Сортамент» с провисанием (стрелой провеса) $f = 1,2 \text{ м}$. Распределенная нагрузка составляет $q = 2500 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$. Изгибная жесткость ванта $EA = 14200000 \text{ Н}$, собственный вес ванта составляет $m = 0,0844 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$, начальный модуль упругости $E = 165000 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$, а коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$. Площадь сечения 1 каната составляет $A = 86,28 \text{ мм}^2$.

Вертикальная составляющая опорной реакции ванта, при шарнирно-неподвижных опорах может быть определена на основе уравнивания сил: $V = 15000 \text{ Н}$. Горизонтальная составляющая опора (распор): $H = 37500 \text{ Н}$. Опорное усилие (сила натяжения) может быть определена из обобщенного уравнения равновесия, учитывающая вертикальные и горизонтальные составляющие: $T = 40388,74 \text{ Н}$

Далее определяем прогиб (деформацию) вантовой конструкции: $\Delta f = 0,0545 \text{ м}$

Начинаем производить расчет удара БПЛА с тросом.

Для этого необходимо определить несколько ключевых параметров. Масса БПЛА $M = 0,25 \text{ т}$.

Определим количество тросов, которые участвуют в момент удара. Допустим, что при столкновении тросов, на которое действует БПЛА $n = 8 \text{ шт.}$

Статическая сила от массы, которая будет действовать на 1 трос $p = 0,03125 \text{ т}$. Момент инерции: $J = 5,838 \cdot 10^{-12} \text{ м}^4$

Для расчета прогибов при ударе необходимо определить длину троса по формуле (1): $L = l[1 + 8/3(f/l)^2] = 12,32 \text{ м}$

Для расчета прогиба троса при ударе можно использовать теорию упругости, основываясь на предположении, что трос под воздействием силы деформируется. Прогиб статический $\Delta_1 = 0,0545 \text{ м}$. Статический прогиб параболического троса $\Delta_2 = 1,432 \text{ м}$

Предположим, что БПЛА приближается к вантовым сооружениям со скоростью $v = 70 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, а угол атаки $\alpha = 90^\circ = 1,57 \text{ рад}$.

Масса БПЛА на 1 трос составит $M = 0,03125 \text{ т}$. Тогда энергия соударения (кинетическая) составит $T = 76,5625 \text{ кДж}$, а потенциальная энергия деформации (статическая) $U_c = 0,1794 \text{ кДж}$.

Потеря кинетической энергии рассчитываем по формуле (16), так как при ударе БПЛА теряет часть своей скорости:

$$T_0 - T = \frac{m_1(V_1 - U)^2}{2} + \frac{m_2(V_2 - U)^2}{2} = 2,145$$

Тогда, динамический коэффициент может быть определен как отношение потенциальной энергии, поглощенной в процессе деформации, к потерянной кинетической энергии и составит $k = 5,7392$. Исходя из динамического коэффициента, динамический прогиб составит $\Delta f = 0,313$.

Статическое усилие растяжения в тросе от удара при действии внешних нагрузок (собственный вес или другие постоянные нагрузки) $N = 0,86$

Динамическое усилие растяжения в тросе от удара можно оценить с учетом ударного воздействия, так как определен динамический коэффициент $N = 0,86 \cdot k = 4,935$

Усилие растяжение в тросе (сумма статического и динамического) $N = 8,9739$

После произведенных необходимы вычислений получаем:

Разрывное усилие троса – 122000 Н

Допускаемое усилие при запасе прочности 0,475 – 5,795 т

Допускаемое усилие при запасе прочности 2,5 – 4,88 т

Полученные результаты позволяют нам сделать следующие выводы:

- Вантовые системы продолжают оставаться актуальным решением не только в архитектуре, но и в строительстве, предлагая преимущества в прочности и эффективности их использования.

- Модель «ломаная линия» позволяет упрощенно рассчитывать ванты, как набор линейных элементов, соединенных в узлах.

- Выявлена необходимость в продолжении исследований вантовых конструкций в области расчета и проектирования, в частности ударных нагрузок.

- Представлены практические решения для расчета вантовых конструкций для ЗОК от БПЛА.

- Установлено, что существующие методы расчета имеют пробелы в области проектирования вантовых конструкций для ЗОК

Литература

1. Ерёмин Г.В., Чёрный С.Н. Система борьбы с беспилотными летательными аппаратами – новый технический уровень и комплексный подход // Военная мысль. 2022. № 7. С. 32-40.
2. Kanu, N.J., Gupta, E., Pendkar, S.M., Sakhare S.A., Munot A., Gupta V.K., Verma G.S. A Few Suggestions to Improve Anti-drone Measures for Combating Against the Drone Menace. Journal of The Institution of Engineers. 2024. Vol. 105, no. 3. P. 761–787. DOI: 10.1007/s40032-024-01047-x
3. Габова В.В., Мельникова Е.С., Чураков А.А. Исследование и разработка методологии проектирования защитных ограждающих конструкций от беспилотных летательных аппаратов // Вестник Волгоградского

государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2025. № 1 (98). С. 28-37.

4. Нугуманова А.Д., Кашеварова Г.Г. Расчет вантовых конструкций на примере оттяжек мачты // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2015. № 3. С. 103-110.

5. Teichgraeber, M. Reliability and durability assessment of bridge stay cables. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2025. Vol. 29. DOI: 10.1007/s43452-024-01086-2

6. Чесноков А.В., Михайлов В.В., Долматов И.В. Определение продольных жесткостей поясов и предварительного напряжения двухпоясовых вантовых ферм // Известия вузов. Строительство. 2024. №9. С. 5-18. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-789-9-5-18.

7. Abdelaziz, M.M., El-Ghazaly, H.A. & Gomaa, M.S. Numerical Modeling for Collapse Analysis of Cable-Stayed Bridges using the Improved Applied Element Method. Iran J Sci Technol Trans Civ Eng. 2024. Vol. 48. pp. 2891–2904. DOI: 10.1007/s40996-024-01343-7

8. Новожилов В.В. Теория упругости. Л.: Судпромгиз, 1958. 370 с.

9. Аверин А.Н. Расчетные модели гибких нитей // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2020. № 9(741). С. 5-19. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-741-9-5-19.

10. Mannacio, F., Di Marzo, F., Gaiotti, M., Rizzo C.M., Venturini M. A Design Approach to Assess Effects of Non-Contact Underwater Explosions on Naval Composite Vessels. J. Marine. Sci. Appl. 2024. Vol. 23. pp. 316–326. DOI: 10.1007/s11804-024-00421-6

11. Кужахметова Э.Р. Методы расчета вант и вантовых конструкций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №2. С. 39–48. DOI: 10.12737/article_5c73fc07ba7858.43737360

12. Бузало Н.А., Пономарев Р.Р., Смирнов В.А. Деформационный расчет вантовых конструкций покрытий спортивных сооружений // Жилищное строительство. 2022. № 10. С. 46–49.
13. Кадисов Г. М., Чернышов В. В. Динамика вантового моста после обрыва ванты // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2011. №22. С. 19-23.
14. 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.
15. Мельникова Е.С., Габова В.В., Чураков А.А., Дроздов В.В. Анализ влияния атак БПЛА на прочность железобетонных конструкций // Инженерный вестник Дона. 2025. №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2025/10047.
16. Сафронов В. С., Антипов А. В. Апробация эффективной методики динамического расчета сталежелезобетонного пролетного строения моста // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». 2020. Т. 7. №. 2. С. 6. DOI: 10.15862/08SATS220
17. Агеева Е. Ю., Тишков В. А., Филимонова А. Е. Конструктивные особенности висячих покрытий в общественных зданиях. Нижний Новгород: ННГАСУ. 2015. 87 с.
18. Григорьев А.Ю., Григорьев К.А., Малявко Д.П. Соударение тел. СПб.: Университет ИТМО. 2015. 43 с.

References

1. Yerëmin G.V., Chërnyy S.N. Voennaia mysl'. 2022. No. 7. Pp. 32-40.
 2. Kanu, N.J., Gupta, E., Pendkar, S.M., Sakhare S.A., Munot A., Gupta V.K., Verma G.S. Journal of The Institution of Engineers. 2024. Vol. 105, No. 3. P. 761–787. DOI: 10.1007/s40032-024-01047-x
-

3. Gabova V. V., Melnikova E. S., Churakov A. A. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura, 2025, Iss. 1, Pp. 28—37. DOI: 10.35211/18154360_2025_1_28.
 4. Nugumanova A.D., Kashevarova G.G. Vestnik PNIPU. Stroitelstvo i arhitektura. 2015. No. 3. Pp. 103-110.
 5. Teichgraeber, M. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2025. Vol. 29. DOI: 10.1007/s43452-024-01086-2
 6. Chesnokov A.V., Mikhaylov V.V., Dolmatov I.V. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo. 2024; (9): 5–18. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-789-9-5-18.
 7. Abdelaziz, M.M., El-Ghazaly, H.A. & Gomaa, M.S. Iranian Journal of Science and Technology. 2024. Vol. 48. Pp. 2891–2904. DOI: 10.1007/s40996-024-01343-7
 8. Novozhilov V.V. Teoriya uprugosti [Theory of elasticity]. Leningrad: Sudpromgiz, 1958. 370 p.
 9. Averin A.N. Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitelstvo. 2020. № 9(741). Pp. 5-19. DOI 10.32683/0536-1052-2020-741-9-5-19.
 10. Mannacio, F., Di Marzo, F., Gaiotti, M., Rizzo C.M., Venturini M. Journal of Marine Science and Application. 2024. Vol. 23. Pp. 316–326. DOI: 10.1007/s11804-024-00421-6
 11. Kuzhakhmetova E.R. Vestnik BG TU im. V.G. Shukhova. 2019. No. 2. Pp. 39–48. DOI: 10.12737/article_5c73fc07ba7858.43737360
 12. Buzalo N.A., Ponomarev R.R., Smirnov V.A. Zhilishchnoe stroitelstvo. 2022. No. 10. Pp. 46–49.
 13. Kadisov G. M., Chernyshov V. V. Vestnik Sibirskoi gosudarstvennoi avtomobilno-dorozhnoi akademii. 2011. No. 22. Pp. 19-23.
 14. Mkrtychev O.V., Savenkov A.Yu. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/ n1y2023/8133.
-



15. Melnikova E.S., Gabova V.V., Churakov A.A., Drozdov V.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2025. № 5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2025/10047
16. Safronov V. S., Antipov A. V. Internet-zhurnal «Transportnye sooruzheniia». 2020. T. 7. No. 2. 6 p. DOI: 10.15862/08SATS220
17. Ageyeva E. YU., Tishkov V. A., Filimonova A. E. Konstruktivnye osobennosti visiachikh pokrytii v obshchestvennykh zdaniakh [Design features of hanging coverings in public buildings]. Nizhny Novgorod: NNGASU. 2015. 87 p.
18. Grigor'yev A.YU., Grigor'yev K.A., Malyavko D.P. Soudarenie tel [Collision of bodies]. Sankt Peterburg: Universitet ITMO. 2015. 43 p.

Дата поступления: 9.05.2025

Дата публикации: 27.06.2025