

Напряженно-деформированное состояние треугольной мембранной панели при действии различных видов поперечных нагрузок

А.М. Ундалов¹, С.В. Клюев², А.В. Клюев², Л.С., Сабитов³, И.Н. Гарькин⁴,

Э.С. Сибгатуллин³

¹ ООО Самолет,

² Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

³ Казанский (Приволжский) федеральный университет

⁴ Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского (Первый казачий университет)

Аннотация: В статье содержатся методика и результаты теоретических и экспериментальных исследований НДС конического радиально-балочного купола с треугольными элементами-оболочками. Производится анализ и сравнение результатов, полученных различными методами. Треугольная мембранная панель является частью конструкции радиально-балочного купола и состоит из опорного контура и стальной мембраны в форме треугольника. Форма треугольника, образующего мембранную панель, может быть различной и зависит от количества ребер в радиально-балочном куполе. Опорный контур представляет собой сжато-изгибаемый элемент купола и выполняется, как правило, из стального прокатного профиля швеллерного сечения. Мембрана изготавливается из тонкого стального листа и крепится к верхней полке швеллера саморезами или точечной сваркой. Показывается несколько вариантов нелинейного статического расчета в различных вычислительных комплексах.

Ключевые слова: строительные конструкции, деревянные конструкции, мембранная панель, напряженно-деформированное состояние, радиально-балочный купол, купол, мембрана, проектирование, экспериментальное исследование.

Разработка новых конструктивных форм радиально-балочных конструкций являются актуальной задачей в области строительства, в связи с возможностью их использования в качестве покрытий на предприятиях народного хозяйства РФ. В настоящей работе рассматриваются экспериментальные исследования конического радиально-балочного купола с треугольными элементами-оболочками. Данные исследования были проведены в специально разработанной лаборатории строительных конструкций. Модели треугольной мембранной панели были изготовлены и испытаны авторами.

Расчеты выполнялись в различных вычислительных комплексах (от равномерной снеговой нагрузки, неравномерной снеговой нагрузки и сосредоточенной монтажной нагрузки). Треугольная мембранная панель является частью конструкции радиально-балочного купола и состоит из опорного контура и стальной мембраны в форме треугольника. Форма треугольника, образующего мембранную панель, может быть различной и зависит от количества ребер в радиально-балочном куполе (в реальных моделях зависит от размера покрытия). Опорный контур представляет собой сжато-изгибаемый элемент купола и выполняется, как правило, из стального прокатного профиля швеллерного сечения. Мембрана изготавливается из тонкого стального листа и крепится к верхней полке швеллера саморезами или точечной сваркой [1,2] (сварка проводилась аттестованным оборудованием и сварщиком).

Для оценки прочности и деформативности стального листа-мембраны, была рассмотрена его работа при действии равномерно-распределенной снеговой нагрузки, неравномерно-распределенной снеговой нагрузки и сосредоточенной монтажной нагрузки [3,4]. Для решения выявленной проблемы, принималось два варианта приложения снеговой нагрузки для зданий с коническими круговыми покрытиями, в соответствии с рис. 1.

Значение расчетной поперечной равномерно-распределенной нагрузки определялась:

$$S=0.7 \cdot \gamma_f \cdot c_e \cdot c_t \cdot \mu \cdot S_g$$

где, γ_f - коэффициент надежности по нагрузке в соответствии с п.10.12 принимался равным 1,4,

c_e – коэффициент сноса принимался равным 1, в запас несущей способности.

c_t - термический коэффициент = 1,0

S_g - вес снегового покрова на 1 м² поверхности земли для IV снегового района принималось равным 240 кг/м² = 0,00235 Мпа.

где μ - коэффициент перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие.

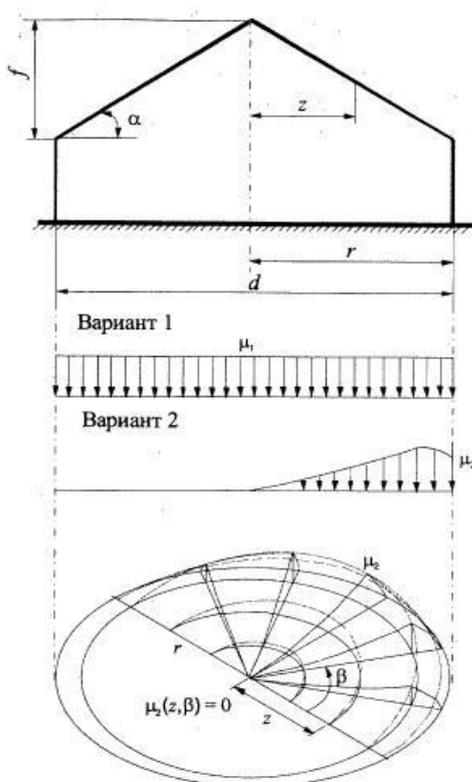


Рис. 1. Варианты приложения нагрузки для зданий с коническими круговыми покрытиями

Для варианта приложения нагрузки №1 $\mu_1 = 1.0$ и $S=0,00235$ МПа. Для варианта №2 при угле купола $\alpha = 15^\circ$ и $\beta=90^\circ$ $C_{r2} = 2.15 \cdot \sqrt[3]{\frac{\alpha\pi}{180^\circ}} = 1.375$, $\mu_2 = C_{r2} (z/r) \sin\beta = 1.375 \cdot (z/r)$. Таким образом, при $z=0,5r$ $\mu_2 = 0,688$, $S=0,00162$ МПа, при $z=r$ $\mu_2 = 1.375$, $S=0,00324$ МПа.

Монтажная нагрузка (вариант №3) была приложена в геометрическом центре треугольника (точка пересечения биссектрис углов треугольника) в качестве сосредоточенной силы интенсивностью $P=1200$ Н (120 кг), распределенной на площадке 100×250 мм [5,6].

Исходные данные для всех вариантов нагрузок: высота равнобедренной треугольной мембраны в свету - 2420 мм, основание – 1100 мм, толщина листа – 0,5 мм, опорный контур - гнутый швеллер 60x32x2,5. Предел текучести материала для стали С245 $R_y = 240$ МПа [7].

Вариант №1: Равномерно-распределенная снеговая нагрузка интенсивностью $S=0,00235$ МПа (240 кг/м^2). Схема приложения нагрузки изображена на рис. 2.

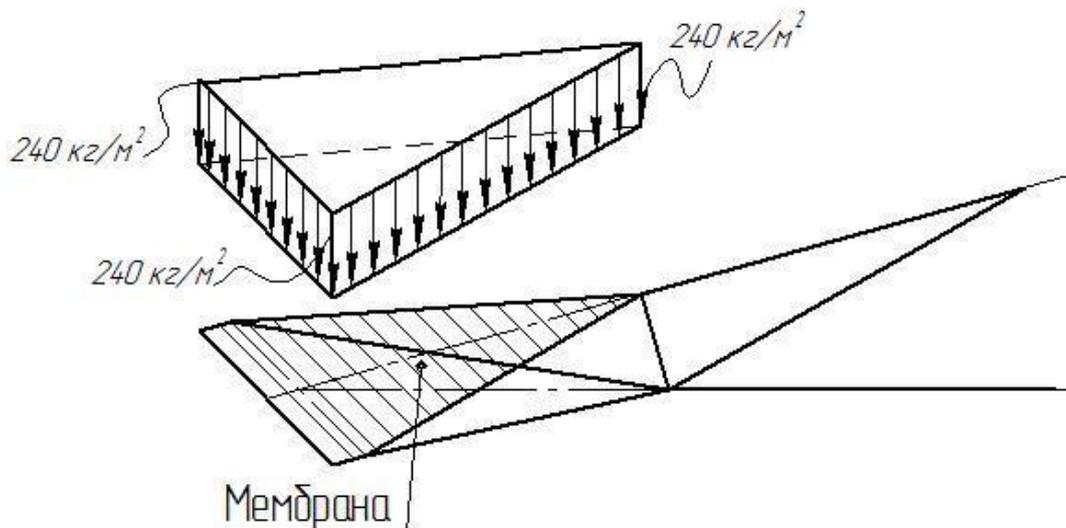


Рис.2 Схема приложения равномерно-распределенной нагрузки на мембрану

На рис. 3. и 4 представлены результаты статического нелинейного расчета МКЭ. Как видно из рис. 3 и 4, максимальный прогиб мембраны расположен на расстоянии $1/2$ высоты треугольника и равен 37,44 мм. В углах треугольной мембраны наблюдаются максимальные эквивалентные напряжения, равные 240 МПа – заданному пределу текучести стали. При расчетной нагрузке наблюдаются обширные зоны напряжений текучести в угловых зонах мембраны, а так же вдоль кромки мембраны. Самая обширная зона пластических деформаций находится в вершине равнобедренного треугольника на расстоянии $1/6$ - $1/8$ высоты [8,9].

Наибольшие изменения напряженно-деформированного состояния мембраны зафиксированы в местах ее примыкания к контуру. На рис. 3 приведено распределение нормальных напряжений σ_x и σ_y (рис. 3,4) и главных напряжений σ_{\max} и σ_{\min} (рис. 5, 6).

Максимальные главные напряжения σ_{\max} с положительным знаком находятся в вершине равнобедренного треугольника на расстоянии 1/6-1/8 высоты с максимальным значением 277,1 МПа. Максимальные главные напряжения σ_{\max} с отрицательным знаком располагаются вдоль кромки мембраны со значениями в диапазоне от -130 до -160 МПа. Фоновые значения главных напряжений σ_{\max} для центральной зоны находятся в пределах 70-90 Мпа [10].

Минимальные главные напряжения σ_{\min} с положительным знаком находятся в вершине равнобедренного треугольника на расстоянии 1/4-1/6 высоты с наибольшим значением 177,8 МПа. Максимальные главные напряжения σ_{\min} с отрицательным знаком располагаются вдоль кромки мембраны с наибольшим значением – 277,1 МПа. Фоновые значения главных напряжений σ_{\min} для центральной зоны находятся в пределах 25-35 МПа.

Максимальные нормальные напряжения σ_x с положительным знаком находятся в вершине равнобедренного треугольника на расстоянии 1/6-1/8 высоты с максимальным значением 277,1 МПа. Максимальные нормальные напряжения σ_x с отрицательным знаком располагаются вдоль кромки мембраны со значениям -276 МПа. Фоновые значения главных напряжений σ_x для центральной зоны находятся в пределах 20-30 Мпа [11,12].

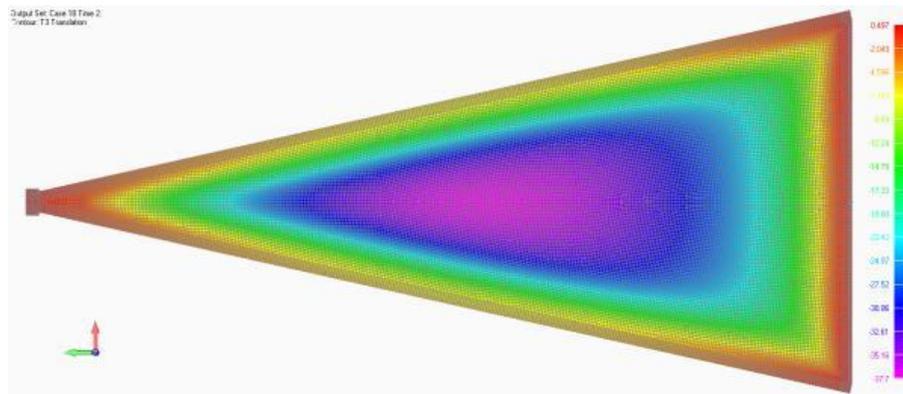


Рис.3. Вертикальные прогибы мембраны

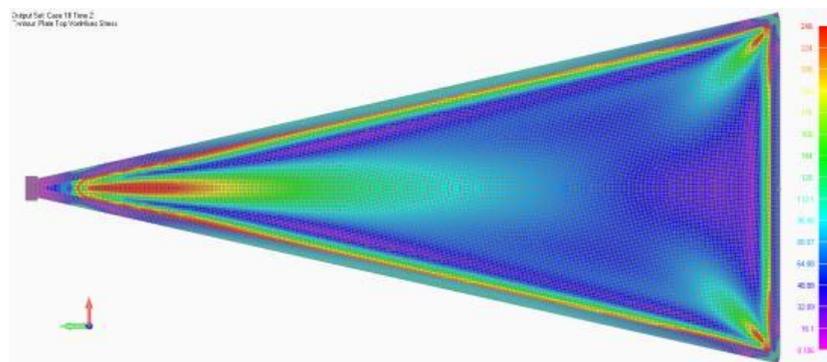


Рис.4. Эквивалентные напряжения в мембране (МПа)

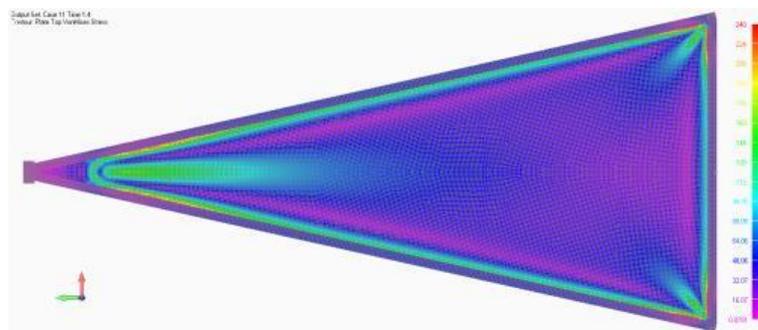


Рис.5. Первые пластические деформации в мембране при нагрузке 96 кг/м^2

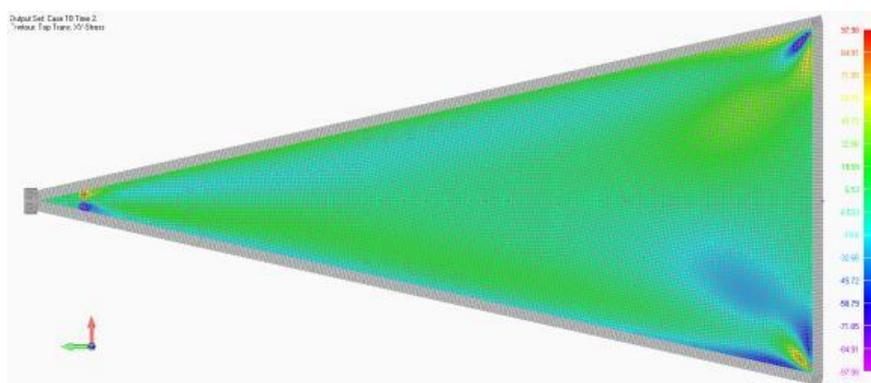


Рис.6. Касательные напряжения в мембране (МПа)

Максимальные нормальные напряжения σ_y с положительным знаком наблюдаются в углах основания равнобедренного треугольника с максимальным значением 277,1 МПа. Также зафиксирована зона повышенных напряжений на расстоянии 1/3-1/5 высоты с максимальными значениями в пределах 160-170 МПа. Максимальные нормальные напряжения σ_y с отрицательным знаком располагаются в углах мембраны вдоль короткой стороны опорного контура со значением -275,8 МПа. Фоновые значения главных напряжений σ_y для центральной зоны находятся в пределах 50-80 Мпа.

На рис. 6. изображено распределение касательных напряжений τ_{xy} . Касательные напряжения возрастают от нуля в центральной зоне мембраны до максимальных значений 20-25 МПа вдоль опорного контура в средней его части и до 40-50 МПа вдоль краев опорного контура. В угловых зонах мембраны, на небольшом участке, наблюдаются экстремальные значения 80-125 Мпа [13,14].

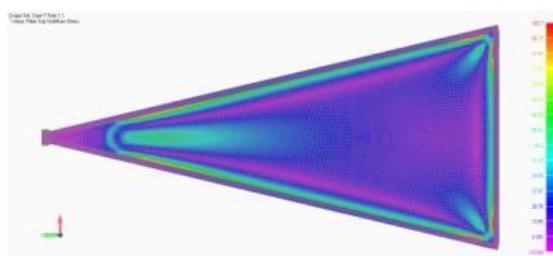


Рис.7. Распределение эквивалентных напряжений при различных ступенях нагружения (МПа) при $\tau = 0.1$

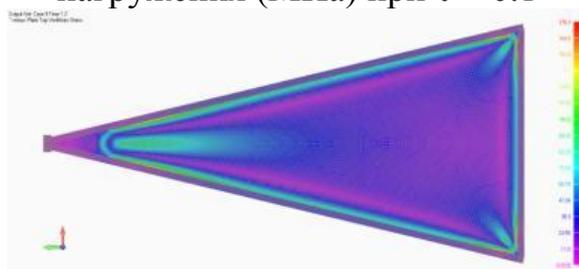


Рис.8. Распределение эквивалентных напряжений при различных ступенях нагружения (МПа) при $\tau = 0.2$

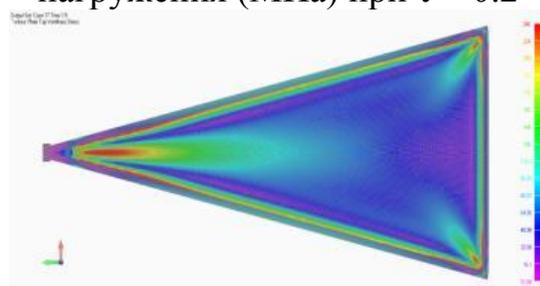


Рис.9. Распределение эквивалентных напряжений при различных ступенях нагружения (МПа) при $\tau = 0.9$

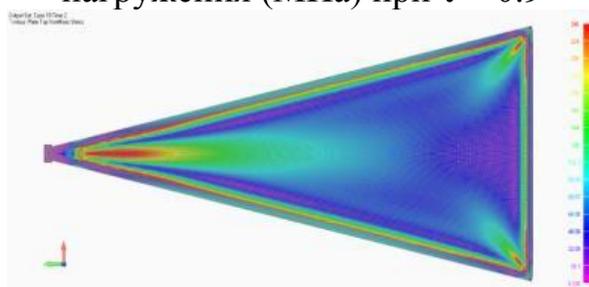


Рис.8. Распределение эквивалентных напряжений при различных ступенях нагружения (МПа) при $\tau = 1.0$

Введем параметр Time (обозначим как τ), который изменяется от 0 до 1 по формуле $\tau = n \cdot \Delta\tau$, где n – номер текущего шага нагрузки, $\Delta\tau = 1/N$, а N – общее количество шагов нагружения. При решении нелинейной задачи нагрузка будет приложена равными частями $\Delta\tau$. На рис. 7-8 изображены

распределения эквивалентных напряжений при различных степенях нагружения [15,16].

Первые эквивалентные напряжения, равные пределу текучести стали, наблюдаются в угловых зонах в месте крепления листа к опорному контуру при $\tau = 0.4$, что соответствует нагрузке $q=0.4 \cdot 240 \text{ кг/м}^2 = 96 \text{ кг/м}^2$. При дальнейшем приложении нагрузки эквивалентные напряжения, равные пределу текучести стали, прогрессируют, обуславливая возникновение в листе мембраны пластических деформаций.

В наиболее нагруженных зонах мембраны по мере возникновения пластических деформаций происходит перераспределение напряжений. Стальной лист работает в упруго-пластической стадии и, несмотря на значительные вертикальные перемещения и наличие локальных зон пластической работы, имеет резерв несущей способности. Таким образом, использование кровель в виде радиально-блочного купола технически целесообразно т.к. такие покрытия будут иметь больший запас прочности, чем аналогичные покрытия.

Литература:

1. Ундалов А.М., Ключев С.В., Ключев А.В., Сабитов Л.С., Гарькин И.Н. Экспериментальные исследования радиально-балочного купола с мембранной кровлей // Системные технологии. 2023. № 3 (48). С. 79-86
2. Ельцов Р.И. Разработка технологического процесса изготовления сварных конструкций // Строительные материалы и изделия. 2021. Т. 4. № 5. С. 35 – 44.
3. Ведяков И.И., Гукова М.И., Фарфель М.И., Кондрашов Д.В., Яровой С.Н. Обследование конструкций зданий и сооружений завода ОАО "Тагмет" // Строительная механика и расчет сооружений. – 2013. – № 1 (246). – С. 58-64.

4. Баламирзоев А.Г., Муртузов М.М., Селимханов Д.Н., Дибирова З.Г., Абдуллаев А.Р. Нелинейные поперечные колебания составных стержней при действии статически приложенной поперечной нагрузки // Строительные материалы и изделия. 2021. Т. 4. № 2. С. 29 – 37.

5. Гучкин И.С., Булавенко В.О. Усиление железобетонной балки стальной затяжкой, накладками и фиброармированным пластиком // Региональная архитектура и строительство. 2012. № 1. С. 69-74.

6. Гучкин И.С., Черячукин В.В., Сафронов Д.Н. Усиление сплошных железобетонных плит при недопустимой коррозии рабочей арматуры // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2010. № 17 (36). С. 4-8.

7. Кузин Н.Я., Багдоев С.Г. Оценка внешних факторов на несущую способность конструкций гражданских зданий // Региональная архитектура и строительство. 2012. №2 С.79-82.

8. Снегирева А.И., Мурашкин В.Г. К вопросу обследования строительных конструкций, зданий и сооружений // Эксперт: теория и практика. 2021. №6 (15). С. 45-51.

9. Шеина С. Г., Виноградова Е.В., Денисенко Ю.С. Пример применения BIM технологий при обследовании зданий и сооружений // Инженерный вестник Дона. 2021. № 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2021/7037

10. Гарькин И.Н., Сабитов Л.С., Гайдук А.Р., Чиркина М.А. Сохранение архитектурных концепций малых населенных пунктов: консервация объектов культурного наследия // Инженерный вестник Дона. 2022. URL: №11: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8017

11. Garkin I.N., Garkina I.A. System approach to technical expertise construction of building and facilities // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. Vol.8. №5. pp.213-217.

12. Языев Б.М., Чепурненко А.С., Литвинов С.В., Языев С.Б. Расчёт трёхслойной пластинки методом конечных элементов с учётом ползучести среднего слоя // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2014. № 2 (33). С. 47-55.

13. Саденко Д.С., Гарькин И.Н., Маилян Л.Р., Сабитов Л.С. Виброметрические методы диагностики строительных конструкций // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. № 3 (59). С. 175-189.

14. Петрова И.Ю., Мостовой О.О. Обзор процесса проведения обследований зданий и сооружений. Проблемы и пути их решения. // Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал. 2013. № 1 (36). С. 12-20.

15. Андреев В.И., Языев Б.М., Чепурненко А.С., Литвинов С.В. Расчет трехслойной полой оболочки с учетом ползучести среднего слоя // Вестник МГСУ. 2015. № 7. С. 17-24

16. Клюев С.В., Гарькин И.Н., Клюев А.В. Сравнительный анализ неразрезных подкрановых балок // Региональная архитектура и строительство. 2022. №3 (32). С. 111–126.

References

1. Undalov A.M., Kljuev S.V., Kljuev A.V., Sabitov L.S., Gar'kin I.N. Sistemnye tehnologii. 2023. № 3 (48). pp. 79-86.

2. El'cov R.I. Stroitel'nye materialy i izdelija. 2021. Т. 4. № 5. Рр. 35 – 44.



3. Vedjakov I.I., Gukova M.I., Farfel' M.I., Kondrashov D.V., Jarovoj S.N. Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij. 2013. № 1 (246). pp. 58-64.
 4. Balamirzoev A.G., Murtuzov M.M., Selimhanov D.N., Dibirova Z.G., Abdullaev A.R. Stroitel'nye materialy i izdelija. 2021. T. 4. № 2. pp. 29 – 37.
 5. Guchkin I.S., Bulavenko V.O. Regional'naja arhitektura i stroitel'stvo. 2012. № 1. pp. 69-74.
 6. Guchkin I.S., Cherjachukin V.V., Safronov D.N. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Serija: Stroitel'stvo i arhitektura. 2010. № 17 (36). pp. 4-8.
 7. Kuzin N.YA., Bagdov S.G. Regional'naya arhitektura i stroitel'stvo. 2012. №2. pp.79-82.
 8. Snegireva A.I., Murashkin V.G. Jekspert: teorija i praktika. 2021. №6 (15). pp. 45-51.
 9. Sheina S. G., Vinogradova E. V., Denisenko Yu. C. Inzhenernyj vestnik Dona. 2021. № 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2021/7037
 10. Gar'kin I.N., Sabitov L.S., Gajduk A.R., Chirkina M.A. Inzhenernyj vestnik Dona. №11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8017
 11. Garkin I.N., Garkina I.A. Contemporary Engineering Sciences. 2015. Vol.8. №5. Pp.213-217.
 12. Jazyev B.M., Chepurnenko A.S., Litvinov S.V., Jazyev S.B. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Tehničeskie nauki. 2014. № 2 (33). pp. 47-55.
 13. Sadenko D.S., Gar'kin I.N., Mailjan L.R., Sabitov L.S. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo jenergetičeskogo universiteta. 2023. T. 15. № 3 (59). pp. 175-189.
-



14. Petrova I.Ju., Mostovoj O.O. Inzhenerno-stroitel'nyj vestnik Prikaspija: nauchno-tehnicheskij zhurnal. 2013. № 1 (36). pp. 12-20.
15. Andreev V.I., Jazyev B.M., Chepurmenko A.S., Litvinov S.V. Vestnik MGSU. 2015. № 7. pp. 17-24.
16. Kljuev S.V., Gar'kin I.N., Kljuev A.V. Regional'naja arhitektura i stroitel'stvo. 2022. №3 (32). pp. 111–126.

Дата поступления: 30.03.2024

Дата публикации: 5.07.2024