

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 624.074.2

### ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ РЕБРИСТОГО КУПОЛА

**Т.Р. Баркая, С.А. Соколов, А.С. Двужилов**

*Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Баркая Т.Р., Соколов С.А., Двужилов А.С., 2025

**Аннотация.** В статье рассматриваются расчет, проектирование купольных конструкций, а также выбор оптимальных геометрических параметров купола в зависимости от высоты стрелы и градуса сектора ребер конструкции. Представлены выводы проведенного исследования.

**Ключевые слова:** купол, покрытие, металлические конструкции, оптимальные параметры.

**DOI:** 10.46573/2658-7459-2025-4-5-12

#### ВВЕДЕНИЕ

Новейшие исследования однозначно подтверждают значительную выгоду от активного использования металлических конструкций в строительстве. Общая направленность развития современной строительной отрасли – это разработка и внедрение легких пространственных решений, которые находят широкое применение в различных сферах: гражданском, промышленном и сельскохозяйственном строительстве. Здания с куполами позволяют максимально реализовать принцип открытой планировки и отличаются привлекательным внешним видом и внутренним обликом. Практический опыт проектирования и возведения объектов демонстрирует, что купольные системы способны перекрывать большие площади, являясь одной из наиболее эффективных конструктивных схем как с точки зрения визуальной составляющей, так и с точки зрения экономии материала. В связи с этим разработка эффективных и экономичных купольных систем остается приоритетным направлением в создании новых видов перекрытий и представляет собой важную и актуальную проблему.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

**Задание геометрических параметров купольной конструкции.** Расчеты выполнялись в соответствии с СП 494.1325800.2020 «Конструкции покрытий пространственные металлические. Правила проектирования». Основными геометрическими параметрами для определения оптимальной конструкции ребристого купола являются высота стрелы (рис. 1) и градус сектора (рис. 2) [1, 5]. Здания с купольными круговыми и близкими к ним по очертанию покрытиями имеют следующие приложенные нагрузки (рис. 3).

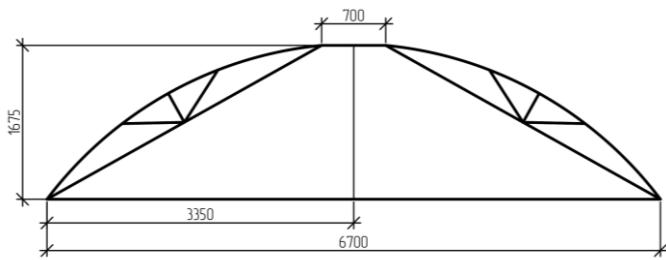


Рис. 1. Схема полуарки с отношением высоты к диаметру 1/4 (рисунок авторов)

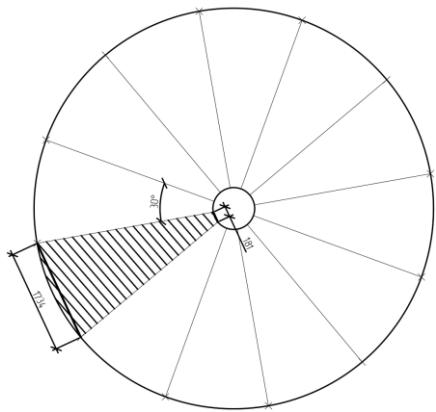


Рис. 2. Грузовые площади для купола с углом сектора 30° (рисунок авторов)

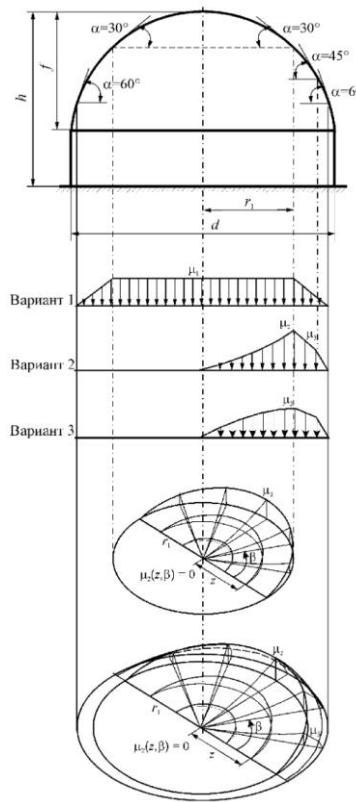


Рис. 3. Схема приложения нагрузок [1]

В расчете используются 1-й и 2-й варианты нагрузок, так как 3-й вариант следует учитывать для куполов только при сильно шероховатой поверхности покрытия, наличии возвышающихся надстроек, фонарей или снегозадерживающих преград [3], а также для покрытий, защищенных от ветра соседними более высокими зданиями или объектами окружающей застройки [4].

После задания начальных условий был произведен расчет нагрузок, приложенных на покрытие, таких как собственный вес, вес конструктивных слоев покрытия, эксплуатационная и сугревая нагрузка [2]. Два варианта сугревой нагрузки по СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» приведены в табл. 1.

*Таблица 1*  
Сугревая нагрузка на купол

Сугревая нагрузка (вариант 1)					
Нагрузка, кг/м <sup>2</sup>	39,4	210	210	210	39,4
Расстояние, мм	0	1 270	3 350	5 430	6 700
Сугревая нагрузка (вариант 2)					
Нагрузка, кг/м <sup>2</sup>	0	0	0	521,2	136
Расстояние, мм	0	1 270	3 350	5 430	6 700

Основной критерий оценки купола – величина снеговой нагрузки второго варианта. Ниже представлены схемы распределения снеговой нагрузки для целой полуарки (рис. 4, 5) для двух первых вариантов по рис. 3.

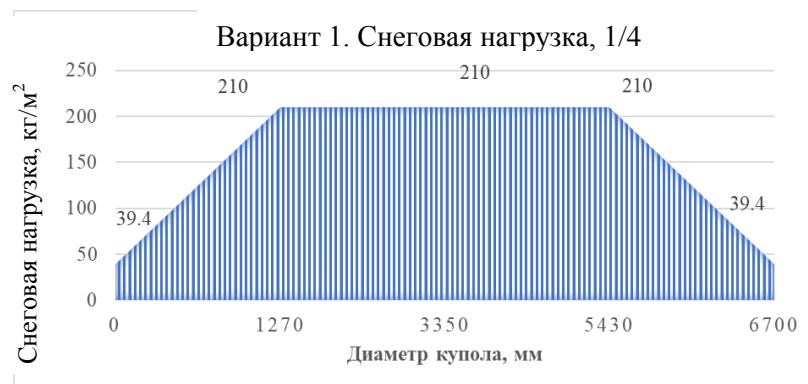


Рис. 4. Эпюра распределения снеговой нагрузки для целой полуарки по 1-му варианту нагружения (рисунок автора)

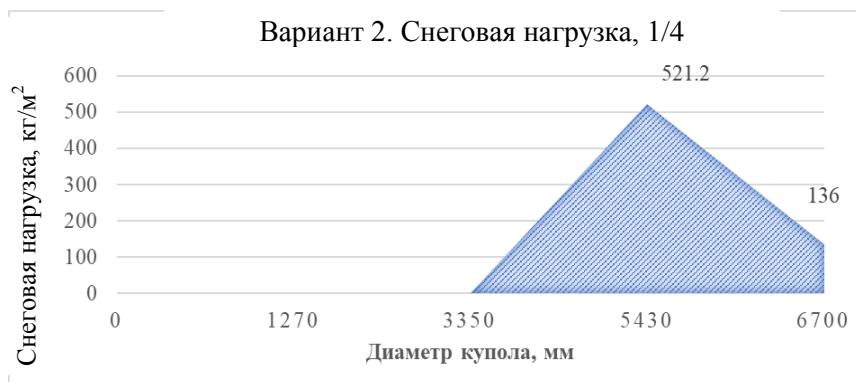


Рис. 5. Эпюра распределения снеговой нагрузки для целой полуарки по 2-му варианту нагружения (рисунок авторов)

Далее было проведено преобразование нагрузки на купол в нагрузку на сектор с учетом грузовой площади для углов 10, 20, 30, 40, 60°. Расчет производился с использованием программы MS Excel. Для иллюстрации на рис. 6, 7 приведены эпюры, а в табл. 2 значения снеговых нагрузок для полуарки с углом сектора 10°.

Таблица 2  
Снеговая нагрузка для полуарки с углом сектора 10 градусов

Снеговая нагрузка (вариант 1)			
Нагрузка, кг/м <sup>2</sup>	39,40	210,00	210,00
Расстояние, мм	0,00	1 270,00	3 350,00
Грузовые площади, мм	583,00	363,00	61,00
Итоговая нагрузка с учетом сектора, кг/м	22,97	76,23	12,81
Снеговая нагрузка (вариант 2)			
Нагрузка, кг/м <sup>2</sup>	136,00	521,20	0,00

Окончание табл. 2

Снеговая нагрузка (вариант 2)			
Расстояние, мм	0,00	1 270,00	3 350,00
Грузовые площади, мм	583,00	363,00	61,00
Итоговая нагрузка с учетом сектора, кг/м	79,29	189,20	0,00

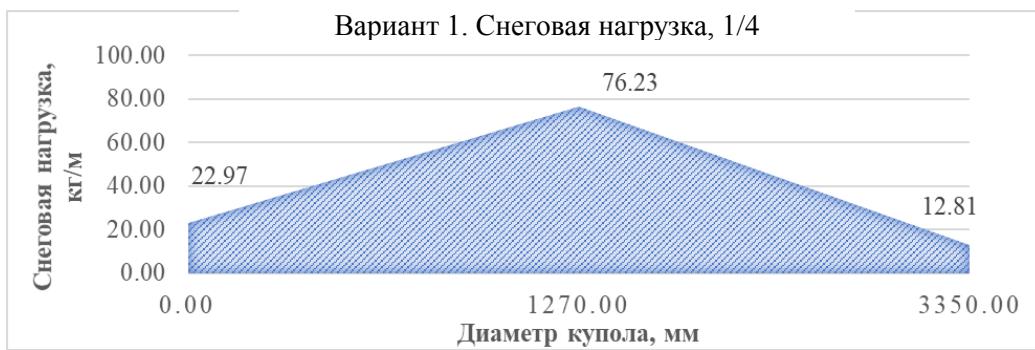


Рис. 6. Эпюра загружения полуарки от снеговой нагрузки по 1-му варианту (рисунок автора)



Рис. 7. Эпюра загружения полуарки от снеговой нагрузки по 2-му варианту (рисунок авторов)

После создания расчетной схемы полуарок в программно-вычислительном комплексе (ПВК) были сформированы загружения с использованием полученных значений нагрузок и вычислены равнодействующие силы для каждого купола с последующим построением графиков для стрелы D/4 (рис. 8). Также был проведен расчет снеговой нагрузки, учитывающий ее неравномерное распределение.

На основе графиков (рис. 8) можно сделать предварительный вывод о том, что учитывать снижение снеговой нагрузки в зависимости от угла сегмента по СП 494.1325800.2020 нецелесообразно, так как средняя погрешность составила менее 5 %. Такая погрешность не может приводить к значительному перерасходу материала, следовательно, дальнейшие расчеты можно выполнить без описанного выше уточнения значений снеговой нагрузки.

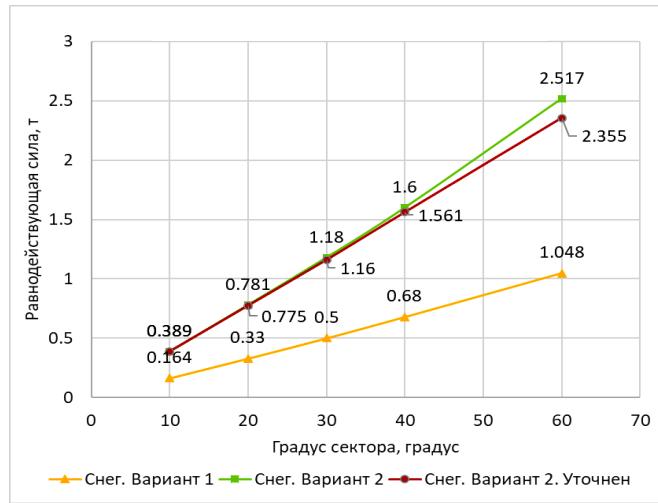


Рис. 8. Итоговый график для D/4 стрелы и уточненной снежной нагрузки (рисунок авторов)

Для систематизации и обобщения итогов проведенного исследования были получены соответствующие данные и построены графики для углов сектора 10, 20, 30, 40, 60° при высотах стрелы полуарки, равных 1/2, 1/4, 1/5, 1/6, 1/7, 1/8 диаметра купола (рис. 9).

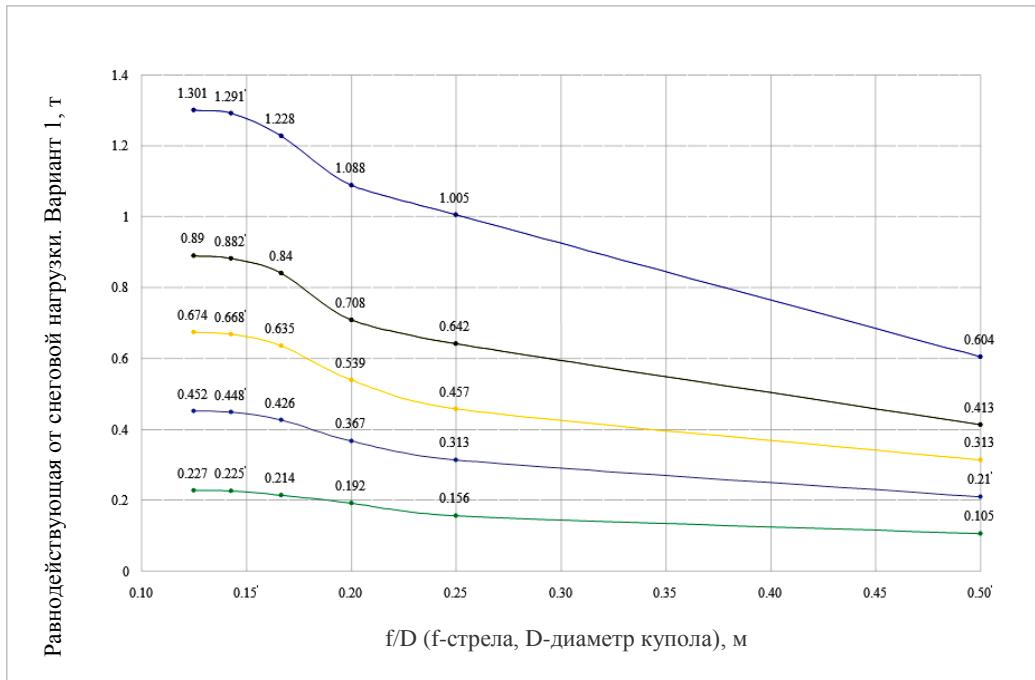


Рис. 9. Зависимость равнодействующей силы от высоты стрелы

Как видно из графиков, при величинах стрелы подъема купола, равных D/6 и менее, происходит резкий рост равнодействующей нагрузки на ребро сектора вне зависимости от его угла. Таким образом, оптимальная стрела купола находится в диапазоне от D/6 до D/2.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для представленных выше значений стрел подъема купола, которые могут рассматриваться как оптимальные, была получена зависимость массы ребра купола от угла сектора между соседними ребрами (рис. 10). При определении материалоемкости конструктивного решения купол рассматривался как набор арок, объединенных между собой кольцевыми прогонами [6, 7].

Как видно из графика, материалоемкость ребра купола возрастает при большей стреле, равной  $D/2$ , хотя при данной стреле значение равнодействующей ниже. Это связано с тем, что с ростом стрелы возрастают изгибающие моменты в верхнем поясе фермы ребра, а также увеличивается его расчетная длина, что в конечном итоге и приводит к увеличению его веса. Кроме того, следует отметить, что с увеличением угла сектора между соседними ребрами масса ребра также возрастает. При этом указанный рост происходит значительно быстрее при стреле большей величины, например при  $D/2$ .

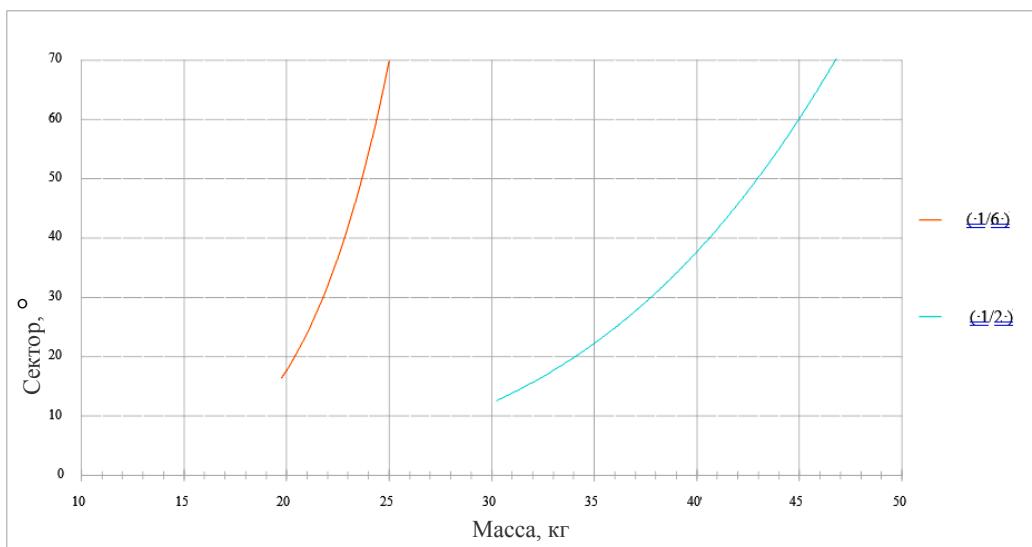


Рис. 10. Материалоемкость ребра купола в зависимости от угла сектора между ребрами

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полученных данных можно сделать вывод, что при вычислении величины равнодействующей силы, приходящейся на одно ребро купола, определяющей является суголовая нагрузка, собранная согласно варианту 2 (СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия»). При этом уточнение указанной нагрузки в зависимости от угла сегмента не приводит к значительному снижению материалоемкости, поскольку величина равнодействующей на ребро изменяется менее чем на 5 %.

Далее следует отметить, что минимальные значения указанной равнодействующей силы наблюдаются при величинах стрелы купола в пределах от  $D/6$  до  $D/2$ . При стреле купола менее  $D/6$  наблюдается резкий скачок равнодействующей силы, что приводит к росту материалоемкости ребристого купола.

При оценке материалоемкости ребра купола на стрелах в пределах от  $D/6$  до  $D/2$  можно сделать однозначный вывод о том, что оптимальной стрелой купола является  $D/6$ , так как при данном значении достигается минимальный вес одного ребра.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Липницкий М.Е. Купола (расчет и проектирование). Ленинград: Стройиздат, 1973. 128 с.
2. Тур В.И. Купольные конструкции: формообразование, расчет, конструирование, повышение эффективности: учебное пособие. М.: Издательство АСВ, 2004. 96 с.
3. Металлические конструкции: в 3 т. Общая часть. (Справочник проектировщика) / под общ. ред. В.В. Кузнецова. М.: Издательство АСВ, 1998. Т. 1. 576 с.
4. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456044318> (дата обращения 10.09.2025).
5. СП 494.1325800.2020 Конструкции покрытий пространственные металлические. Правила проектирования. URL: <https://docs.cntd.ru/document/603253367> (дата обращения: 12.09.2025).
6. Трофимов В.И., Каминский А.М. Легкие металлические конструкции зданий и сооружений. М.: Издательство АСВ, 2002. 573 с.
7. Проектирование металлических конструкций. Часть 2: «Металлические конструкции. Специальный курс»: учебник для вузов / А.Р. Туснин, В.А. Рыбаков, Т.В. Назмееева [и др.] / под общ. ред. А.Р. Туснина. М.: Издательство «Перо», 2023. 436 с.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

*БАРКАЯ Темур Рауфович* – кандидат технических наук, доцент кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: btrs@list.ru

*СОКОЛОВ Сергей Александрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: sokolov\_project@mail.ru

*ДВУЖИЛОВ Антон Сергеевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов, теории упругости и пластичности, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: anton\_in\_tver@mail.ru

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА**

Баркая Т.Р., Соколов С.А., Двужилов А.С. Особенности выбора оптимальной конфигурации ребристого купола // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 4 (28). С. 5–12.

## FEATURES OF CHOOSING THE OPTIMAL CONFIGURATION OF THE RIBBED DOME

***T.R. Barskaya, S.A. Sokolov, A.S. Dvuzhilov***

*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The article discusses the calculation and design of dome structures, as well as the choice of optimal geometric parameters of the dome depending on the height of the boom and the degree of the sector of the ribs of the structure. The conclusions of the conducted research are presented.

**Keywords:** dome, coating, metal structures, optimal parameters.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*BARKAYA Temur Raufovich* – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: btrs@list.ru

*SOKOLOV Sergey Aleksandrovich* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: sokolov\_project@mail.ru

*DVUZHILOV Anton Sergeyevich* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Materials Resistance, Elasticity and Plasticity Theory, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: anton\_in\_tver@mail.ru

### CITATION FOR AN ARTICLE

Barkaya T.R., Sokolov S.A., Dvuzhilov A.S. Features of choosing the optimal configuration of the ribbed dome // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 4 (28), pp. 5–12.

УДК 691.517

## ПОДБОР ОПТИМАЛЬНОГО ЗЕРНОВОГО СОСТАВА ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ ДОРОЖНОГО БЕТОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

***В.В. Белов, М.А. Смирнов***

*Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Белов В.В., Смирнов М.А., 2025

**Аннотация.** Трудносовместимые требования по высокой пластичности бетонной смеси и высоким эксплуатационным показателям дорожного бетона можно выполнить только на основе научных принципов формирования структуры бетонной матрицы с максимальной плотной упаковкой зерен заполнителя, причем с непрерывной гранулометрией, и применением комплекса добавок (микронаполнителей и химических добавок с пластифицирующим и воздухововлекающим (для создания резервной пористости)