

УДК 621.642.07

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ И ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ СХЕМОЙ
КУПОЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ РЕЗЕРВУАРОВ
ДЛЯ ХРАНЕНИЯ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ**

Порываев И.А., Сафиуллин М.Н., Семенов А.А.¹

*Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа
e-mail: ¹asfugntu@yandex.ru*

Аннотация. *Постоянно растущий парк резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов делает актуальным вопрос их рационального проектирования. При проектировании покрытий резервуаров в условиях IV - VIII снеговых районов России основной вклад в напряженно-деформированное состояние конструкций вносит снеговая нагрузка. Нормативные документы позволяют варьировать параметрами геометрической схемы купольных покрытий. Установлена качественная и количественная картина влияния снеговой нагрузки на несущие элементы покрытий вертикальных цилиндрических резервуаров при варьировании их геометрическими параметрами.*

Ключевые слова: *вертикальный цилиндрический резервуар, купольное покрытие, симметричная и несимметричная схемы снеговой нагрузки, стрела подъема, нормальные напряжения, материалоемкость*

Введение

В России насчитывается более 50000 вертикальных цилиндрических резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов [8]. Большинство объектов располагаются на территориях с неблагоприятными климатическими условиями. В качестве покрытий таких сооружений наиболее часто используются конические и сферические купола [5]. Несущие конструкции покрытий резервуаров воспринимают воздействия от собственного веса, вакуумметрического давления, избыточного давления, давления продукта, температурные воздействия, нагрузки от снегового покрова и особые воздействия.

На сегодняшний день величина и характер распределения снеговой нагрузки на конические и сферические покрытия на круглом плане определяются согласно схемам Г.13, Г.14 (рис. 1) [6]. При этом необходимо учитывать симметричную (снег 1) и несимметричную (снег 2) схемы снеговой загрузки. Согласно формулам [6] величина снеговой нагрузки во многом зависит от геометрических параметров покрытия (диаметра и высоты).

При исследовании сферического купольного покрытия резервуара РВС 20000 (диаметр 39,9 м, высота стенки 18 м, стрела подъема купола 7 м), выполненного по ребристой конструктивной схеме, был проанализирован вклад отдельных загрузок в напряженно-деформированное состояние (НДС) основных несущих конструкций (табл. 1). Расчетная схема купола в среде программного комплекса SCAD представлена на рис. 2.

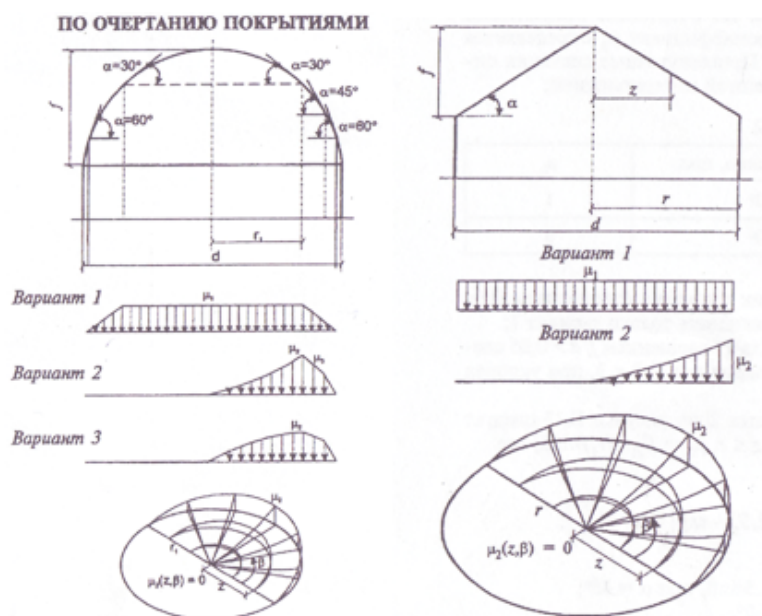


Рис. 1. Схемы Г.13, Г.14 для перехода от снеговой нагрузки на поверхность земли к снеговой нагрузке на покрытие (согласно [6])

Таблица 1. Вклад отдельных загрузок в НДС покрытия

Загрузка	Значение нагрузки	Максимальное продольное усилие в ребре N_{max} (кН)	Относительные вертикальные деформации f/L
Собственный вес	по плотности материалов	-20,2	$3,75 \times 10^{-5}$
Вакуумметрическое давление	0,25 кПа	-23,7	$5,55 \times 10^{-5}$
Избыточное давление	2 кПа	178,5	44×10^{-5}
Снеговая 1 (симметричная) (V район)	3,2 кПа	-218,8	$53,5 \times 10^{-5}$
Снеговая 2 (несимметричная) (V район)	согласно СНиП	-463,6	280×10^{-5}
Давление продукта	$\gamma = 10,15 \text{ кН/м}^3$ *	-56,9	145×10^{-5}
Температурный перепад	-57 °C	-70,6	120×10^{-5}

* γ – удельный вес хранимого продукта

Из табл. 1 видно, что наиболее неблагоприятным нагружением для купола является снеговая нагрузка. Расчет выполнен для V снегового района. Величины усилий, возникающих в радиальных ребрах купола при нагрузках IV - VIII снеговых районов, представлены в табл. 2.

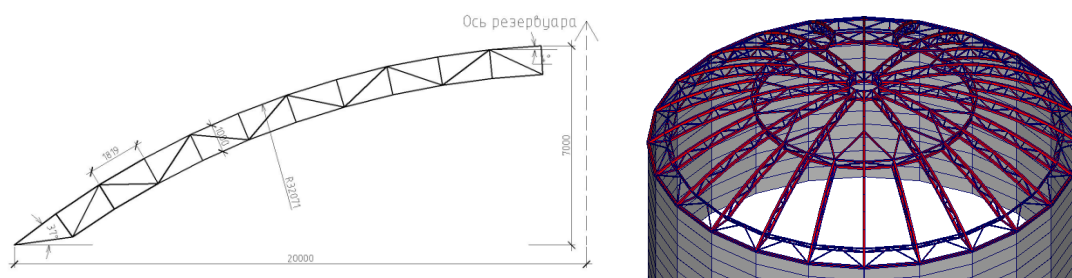


Рис. 2. Геометрические параметры и расчетная схема купола покрытия РВС 20000 в среде SCAD

Доля симметричной схемы снеговой нагрузки в максимальной величине сжимающих усилий составляет 49 % в IV снеговом районе и 70 % в VIII. Аналогичный показатель при несимметричной снеговой нагрузке изменяется с 67 % до 82,5 % соответственно.

Таблица 2. Усилия в ребрах купола при различной величине снеговой нагрузки

Снеговой район (расчетное значение нагрузки, кПа)	Максимальные продольные усилия, кН	
	Симметричное загружение	Несимметричное загружение
IV (2,4)	-164,1	-347,8
V (3,2)	-218,8	-463,6
VI (4,0)	-273,5	-579,4
VII (4,8)	-328,2	-695,4
VIII (5,6)	-382,9	-811,3

Геометрическими параметрами купола являются диаметр D и высота (стрела подъема) f . Высота стенки и диаметр резервуара при заданном объеме регламентируются нормативными документами [3]. Рекомендован определенный диапазон варьирования высотой покрытия резервуаров. В частности, те же нормы [3] предлагают задаваться радиусом образующей сферического купольного покрытия в пределах от $0,8D$ до $1,2D$ для бескаркасных крыш и от $0,8D$ до $1,5D$ для каркасных. В работе [1] рекомендуют задаваться высотой купольной крыши равной $0,24D$, что позволит минимизировать величину симметричной (вариант 1 на рисунке 1) снеговой нагрузки.

Эффективным способом снижения материалоемкости покрытий вертикальных цилиндрических резервуаров является уменьшение снеговой нагрузки по всевозможным схемам нагружения.

Целью исследования является установление зависимостей между параметрами геометрической схемы купольного покрытия резервуара (стрелой подъема, диаметром) и НДС системы в случаях, когда снеговые нагрузки являются определяющими.

Основная часть

Общий суммарный вес снега на сферическом покрытии (при симметричном и несимметричном нагружениях) определяется двойным интегралом, взятым по площади проекции покрытия на горизонтальную плоскость:

$$P_c^{c\phi} = 2 S_g \int_0^R \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \mu_c z dz d\beta ; \quad (1)$$

$$P_n^{c\phi} = S_g \int_0^R \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \mu_n z dz d\beta , \quad (2)$$

где P_c, P_n – суммарный вес снега при действии симметричного и несимметричного снеговых нагружений; μ_c, μ_n – коэффициенты, характеризующие изменение интенсивности снеговой нагрузки [6].

Аналогично определяется суммарный вес снега на коническом покрытии. Проведя вычисления для веса снегового покрова, получим выражения:

для симметричной снеговой нагрузки

$$P_c^{c\phi} = P_c^{кон} = \mu_c S_g \pi R^2 ; \quad (3)$$

для несимметричной снеговой нагрузки

$$P_n^{c\phi} = 0,5 C_{r1} S_g r_1^2 \quad \text{при } R \leq r_1 ; \quad (4)$$

$$P_n^{c\phi} = S_g (0,5 C_{r1} r_1^2 + \int_{r_1}^R \int_{-\pi/2}^{\pi/2} (kz + b) z \sin \beta dz d\beta) \quad \text{при } R > r_1 ; \quad (5)$$

$$P_n^{кон} = \frac{2}{3} C_{r2} S_g R^2 . \quad (6)$$

Значения суммарного веса снегового покрова на покрытии резервуара РВС 20000, вычисленные для конического и сферического покрытий при $0 \leq f/D \leq 0,175$ представлены в табл. 3.

Таблица 3. Значения веса снегового покрова для РВС 20000

Стрела подъема f , м (f/D)	Сфера		Конус	
	P_c , кН	P_n , кН	P_c , кН	P_n , кН
0 (0)	3999	.*	3999	.*
1 (0,025)	3999	.*	3999	.*
2 (0,05)	3999	.*	3999	.*
3 (0,075)	3999	390	3999	968
4(0,1)	3999	757	3999	1064
5 (0,125)	3999	1223	3999	1143
6 (0,15)	3951	1689	3999	1210
7 (0,175)	3750	1916	3999	1270

* при данных параметрах не учитывается вариант с несимметричным приложением нагрузки [6]

Параметром покрытия, влияющим на величину симметричной снеговой нагрузки, является радиус R (см. формулу 3) сооружения. При изменении стрелы подъема покрытия (в рассмотренном диапазоне) величина симметричной нагрузки меняется незначительно. На рис. 3 представлены зависимости веса снега от стрелы подъема купола при несимметричном приложении нагрузки.

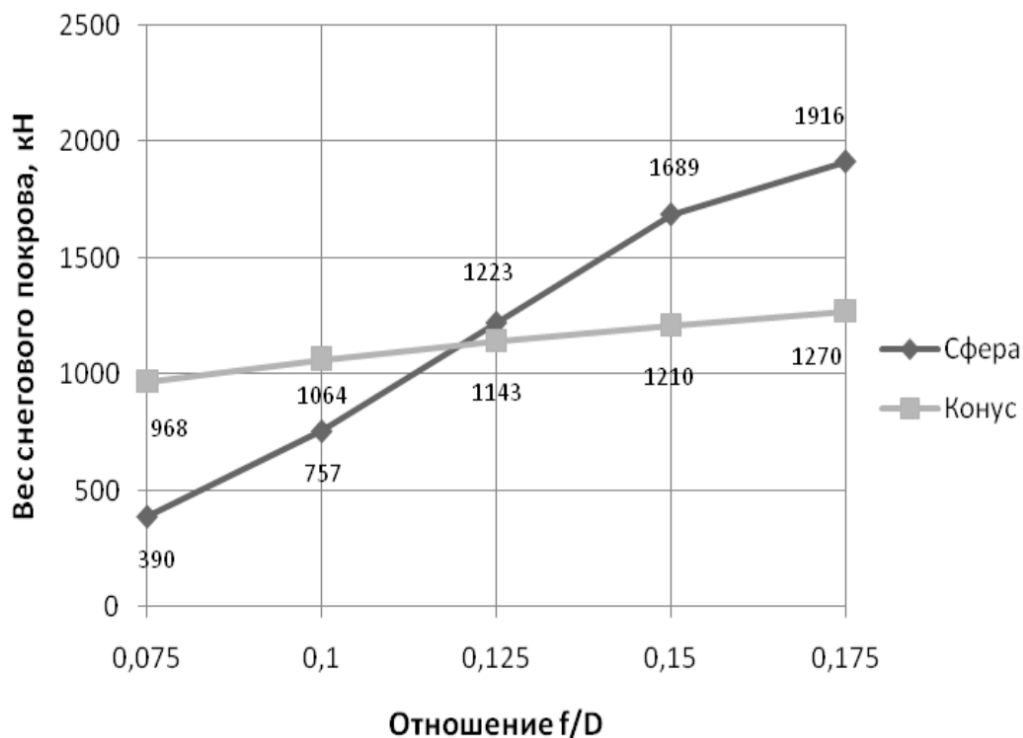


Рис. 3. Зависимость веса снегового покрова при несимметричной схеме приложения нагрузки от стрелы подъема купола РВС 20000

Увеличение стрелы подъема покрытий ведет к увеличению общего значения веса снегового покрова, при этом для сферических покрытий градиент возрастания веса превышает подобный показатель для конических покрытий.

При выборе проектных решений в качестве критерия рациональности принят показатель материалоемкости основных несущих конструкций (m). Материалоемкость (вес) конструктивного элемента, при расчете по первой группе предельных состояний, зависит от величины усилий (напряжений) в наиболее опасном сечении и его геометрической длины [7]:

$$m = f(M, N, Q, L). \quad (7)$$

Для определения зависимостей параметров состояния системы от стрелы подъема покрытия, произведены расчеты методом конечных элементов в комплексе SCAD Office [4]. Анализировались купола покрытий резервуаров, выполненные по ребристой конструктивной схеме. Упрощенная расчетная модель такого покрытия представлена на рис. 4.

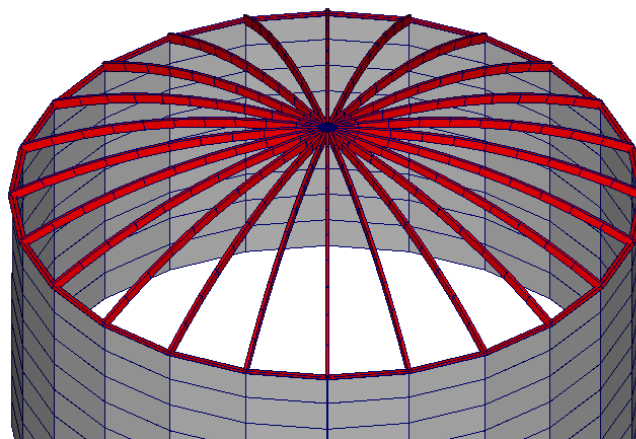


Рис. 4. Расчетная модель купола покрытия

Для всех рассмотренных схем поперечные сечения основных несущих элементов одинаковы. В качестве оценочного критерия приняты нормальные напряжения (σ) в наиболее нагруженных сечениях элементов схемы. Напряжения вычислялись по приближенной формуле Ясинского для сжато-изгибаемых элементов [7]:

$$\sigma = \frac{N}{0,7A} + \frac{M}{W}, \quad (8)$$

где N , M – значения продольной силы и изгибающего момента в сечении элемента; $\varphi = 0,7$ – осредненное значение коэффициента продольного изгиба; A , W – площадь и момент сопротивления сечения элемента соответственно.

Результаты численного эксперимента проведенного для сферического и конического куполов резервуара РВС 20000 представлены на рис. 5, 6.

Результаты расчетов показывают, что для сферического купола (рис. 5) характерна нелинейная зависимость нормальных напряжений от стрелы подъема купола при симметричном снеговом загрузении (снег 1). Величина напряжений, при этом, снижается с увеличением высоты купола. Это объясняется уменьшением (при увеличении высоты купола) изгибной составляющей усилий в радиальных, сжато-изогнутых элементах купола. Характер изменения напряжений при несимметричном снеговом загрузении (снег 2) линейный, соответствующий характеру изменения веса снегового покрова на покрытии (см. рис. 3). В диапазоне $0 \leq f/D \leq 0,1$ определяющий вклад в НДС конструкций покрытия вносит симметричная снеговая нагрузка. При увеличении высоты купола ($0,1 \leq f/D \leq 0,175$) решающим становится несимметричное снеговое загрузение.

Для конического покрытия (рис. 6) тенденции имеют менее выраженный характер, с преобладанием напряжений от симметричного загрузения на всем исследуемом интервале аргумента.

Зависимости веса снегового покрова и величины максимальных нормальных напряжений в радиальных элементах от высоты сферического купола покрытия для резервуаров РВС 10000 (диаметр 28,5 м., высота стенки 18 м.) и РВС 5000 (диаметр 20,92 м., высота стенки 15 м.) представлены на рис. 7 - 10.

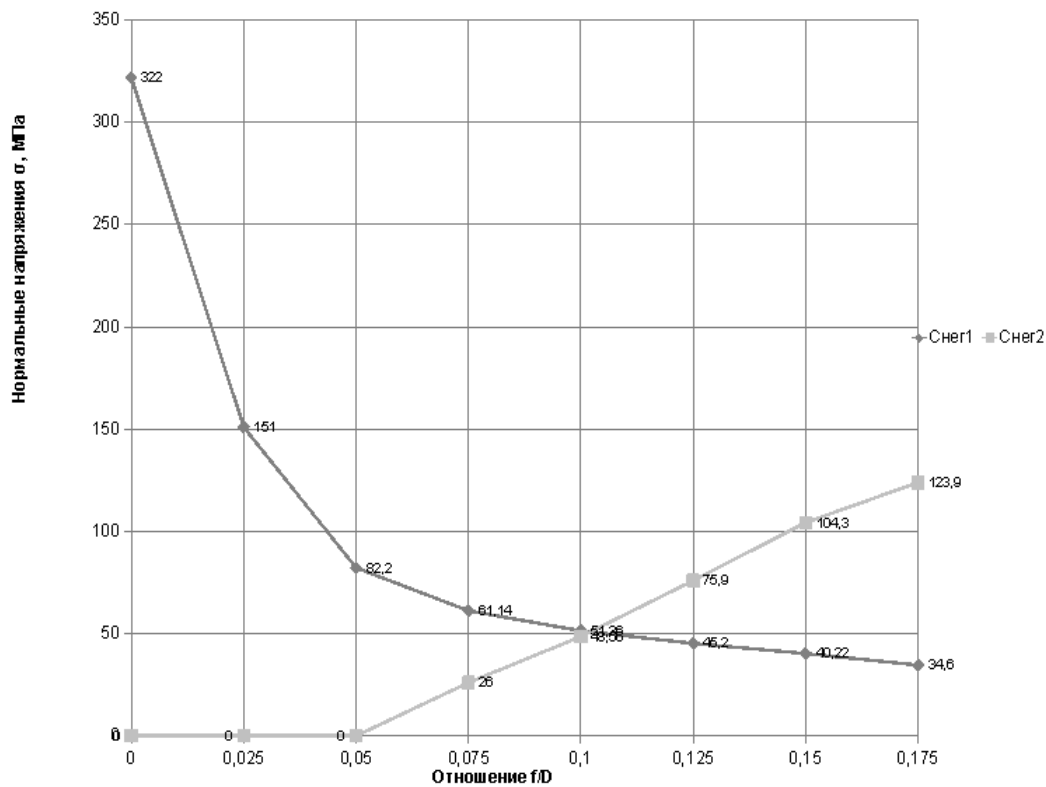


Рис. 5. Зависимость величины нормальных напряжений от стрелы подъема сферического купола РВС 20000

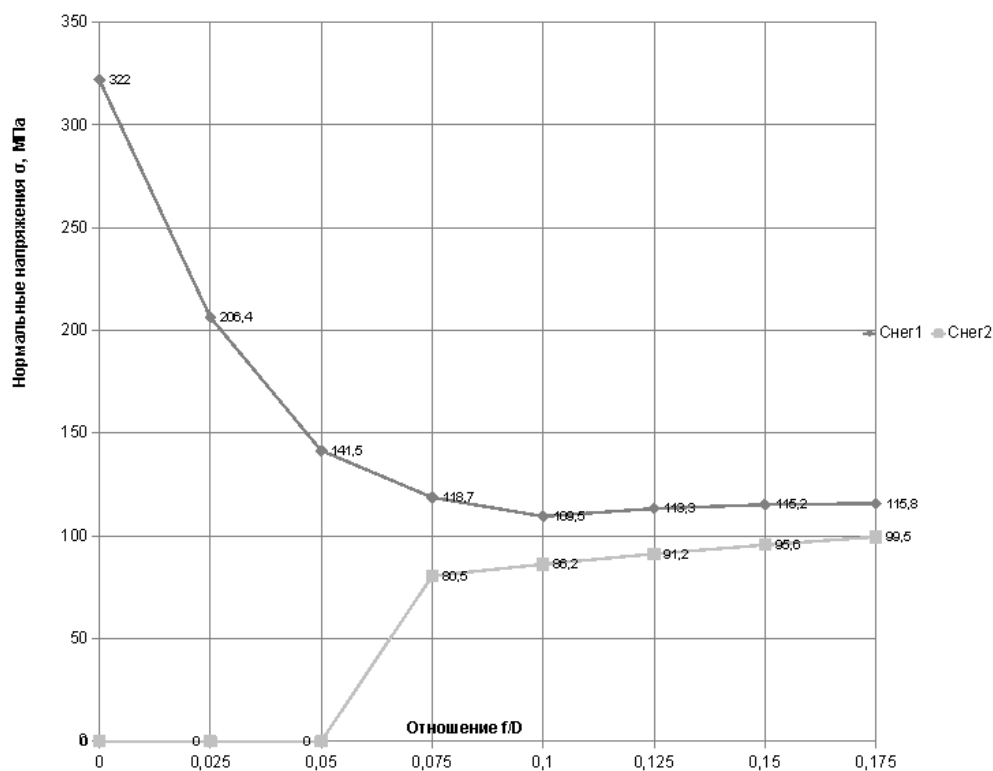


Рис. 6. Зависимость величины нормальных напряжений от стрелы подъема конического купола РВС 20000

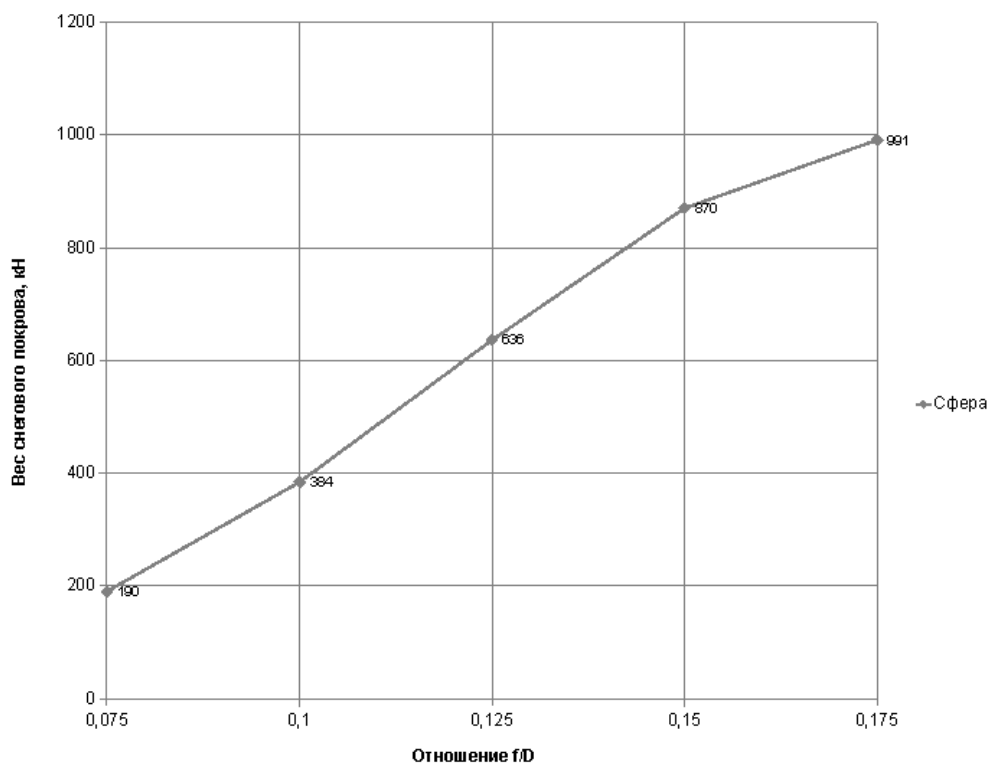


Рис. 7. Зависимость веса снегового покрова при несимметричной схеме приложения нагрузки от стрелы подъема купола РВС 10000

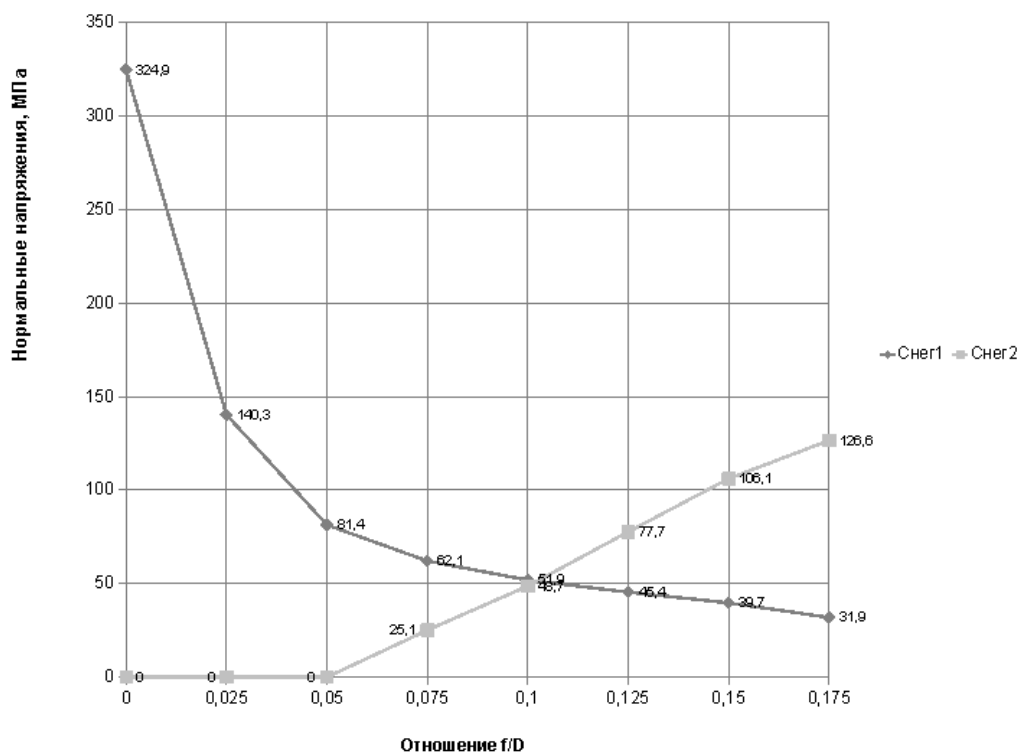


Рис. 8. Зависимость величины нормальных напряжений от стрелы подъема сферического купола РВС 10000

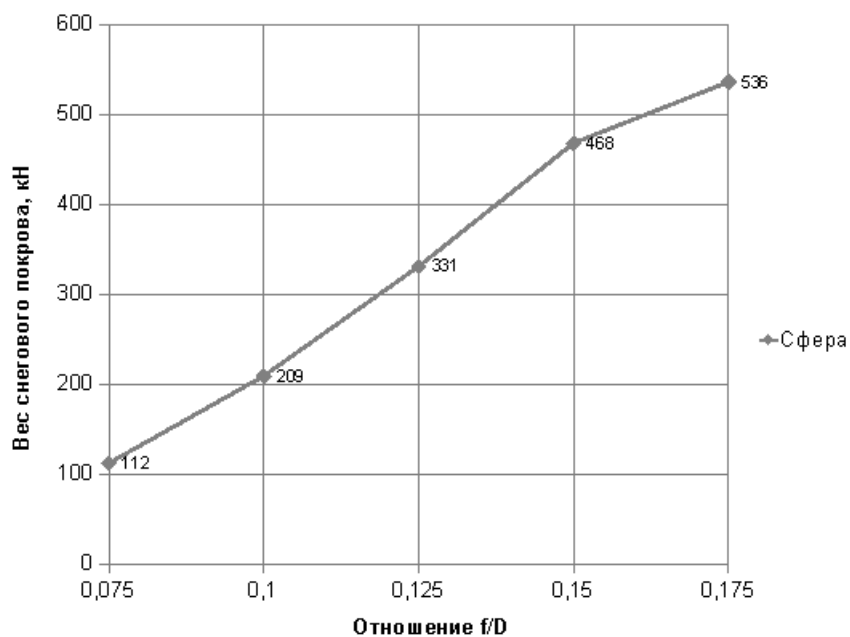


Рис. 9. Зависимость веса снегового покрова при несимметричной схеме приложения нагрузки от стрелы подъема купола РВС 5000

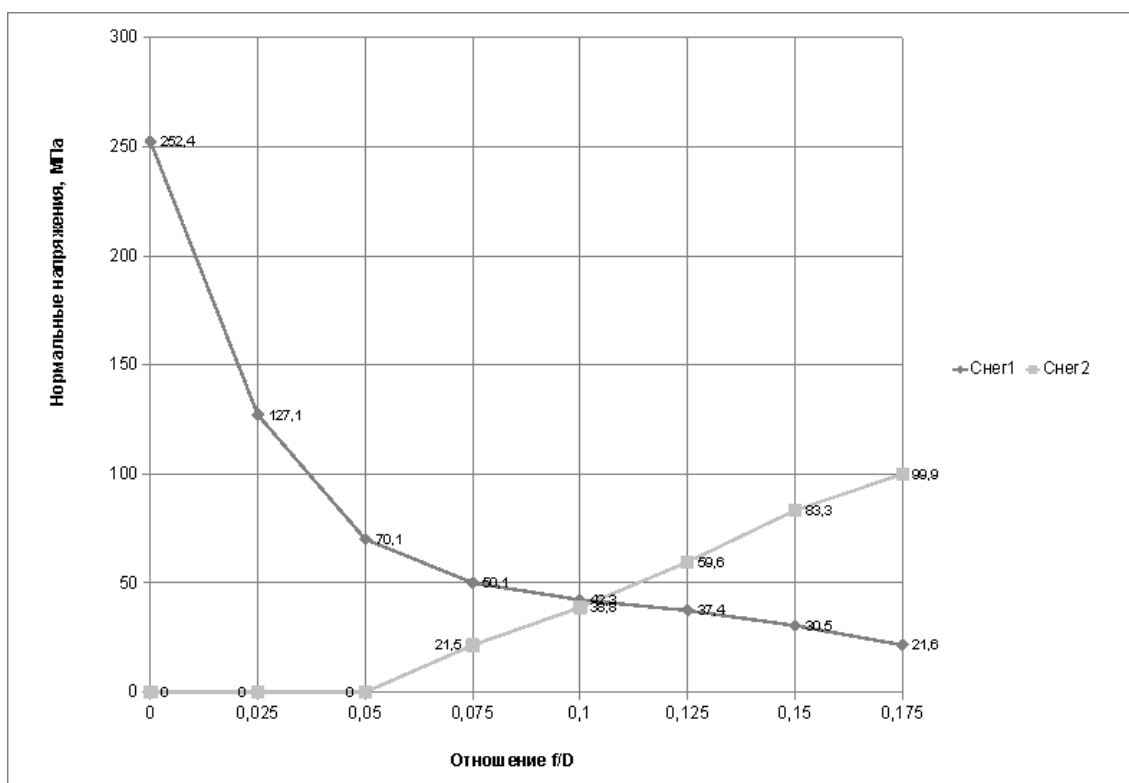


Рис. 10. Зависимость величины нормальных напряжений от стрелы подъема сферического купола РВС 5000

Характер изменения исследуемых параметров (вес снега, максимальные нормальные напряжения в элементах купола) аналогичен для резервуаров РВС 5000, РВС 10000 и РВС 20000. На графиках (см. рис. 5, 8, 10) можно выделить область (при $f/D = 0,1$) в которой напряжения от равномерного и неравномерного снеговых загрузок одинаковы. Это позволяет рекомендовать при проектировании купольных покрытий резервуаров в исследованном интервале диаметров задаваться $0,09 \leq f/D \leq 0,11$.

Материалоемкость радиальных элементов сферического купола РВС 5000, вычисленная при различных значениях стрелы подъема покрытия представлена в табл. 4. Купол был рассчитан с учетом двух взаимоисключающих загрузок: постоянная нагрузка + симметричная снеговая, постоянная нагрузка + несимметричная снеговая.

Таблица 4. Материалоемкость радиальных элементов купола покрытия РВС 5000

Отношение f/D	Масса радиальных ребер, T_c	Расчетное сочетание нагрузок
0	21,3	Постоянная+снеговая симметричная
0,025	6,5	Постоянная+снеговая симметричная
0,05	5,3	Постоянная+снеговая симметричная
0,075	5,3	Постоянная+снеговая симметричная
0,1	5	Постоянная+снеговая симметричная
0,125	8,4	Постоянная+снеговая несимметричная
0,15	9,12	Постоянная+снеговая несимметричная
0,175	9,84	Постоянная+снеговая несимметричная

Выводы

1. Анализ напряженно-деформированного состояния несущих конструкций покрытий резервуаров, проектируемых для IV - VIII снеговых районов РФ показал, что определяющей является снеговая нагрузка, которая может действовать на покрытие по симметричной и несимметричной схемам;

2. Для рассмотренных куполов в интервале $0 < f/D < 0,075$ определяющей является симметричная схема снеговой нагрузки;

3. Для сферических куполов при $0,1 < f/D < 0,175$ определяющий вклад в НДС вносит несимметричная схема снеговой нагрузки;

4. Выявлено, что для поиска геометрии сферических покрытий резервуаров снеговая нагрузка является параметром оптимизации;
5. Найдены соотношения стрелы подъема к диаметру купольного покрытия, при которых снеговая нагрузка имеет равный вклад в НДС, независимо от схемы приложения;
6. Рекомендуется при проектировании купольных покрытий резервуаров в исследованном диапазоне диаметров задаваться $0,09 \leq f/D \leq 0,11$.

Литература

1. Востров В.К., Кандаков Г.П., Кулахметьев Р.Р. Резервуаростроение. Проблемы развития. Вопросы создания новой нормативной базы // Монтажные и специальные работы в строительстве. 2010. № 12. С. 2-10.
2. Востров В.К., Павлов А.Б. Вопросы расчета экстремальных снеговых нагрузок на купольные покрытия // Промышленное и гражданское строительство. 2005. № 7. С. 39-42.
3. ГОСТ 31385 - 2008. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2010. 53 с.
4. Карпиловский В.С., Криксунов Э.З., Маляренко А.А., Микитаренко М.А., Перельмутер А.В, Перельмутер М.А. Вычислительный комплекс SCAD. М.: Издательство «СКАД СОФТ», 2009. 656 с.
5. Нехаев Г.А. Проектирование и расчет стальных цилиндрических резервуаров и газгольдеров низкого давления. М.: Издательство АСВ, 2005. 215 с.
6. СП 20.13330.2011 Нагрузки и воздействия (актуализированная редакция СНиП 2.01.07 – 85*), М.: Минрегион России, 2010. 80с.
7. Трофимович В.В., Пермьяков В.А. Оптимизация металлических конструкций. Киев: Вища школа, 1983. 200 с.
8. Ханухов Х.М. Развитие системы обеспечения циклической прочности и промышленной безопасности строительных сварных металлоконструкций. – Автореферат дисс.... докт. техн. наук. М.: УГТУ-УПИ. 2011. 68 с.

**DETERMINATION OF DEPENDENCIES BETWEEN PARAMETERS
OF THE STRESS AND STRAIN STATE OF BEARING CONSTRUCTIONS
AND GEOMETRY OF DOME ROOFS OF VERTICAL CYLINDRICAL TANKS
FOR OIL AND PETROLEUM PRODUCTS**

I.A. Poryvaev, M.N. Safiullin, A.A. Semenov¹

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

e-mail: ¹asfugntu@yandex.ru

Abstract. *The ever-growing park of storage tanks for oil and petroleum products makes topical question their optimal synthesis. At designing of coverings of tanks in the conditions of IV - VIII snow areas of Russia the basic contribution to their stress and strain state is brought by snow loading. Norms allowed varying the parameters of the geometrical scheme of domes. Set qualitative and quantitative picture of the impact of snow loads for load-bearing elements of vertical cylindrical tanks with coatings to vary their geometrical parameters.*

Keywords: *vertical cylindrical tank, dome roof, symmetric and asymmetric schemes snow loads, rise, direct stress, materials consumption*

References

1. Vostrov V.K., Kandakov G.P., Kulakhmet'ev R.R. Rezervuarostroenie. Problemy razvitiya. Voprosy sozdaniya novoi normativnoi bazy (Construction of reservoirs. Development issues. Questions of creation of a new regulatory framework), *Montazhnye i spetsial'nye raboty v stroitel'stve*, 2010, Issue 12, pp. 2-10.
2. Vostrov V.K., Pavlov A.B. Voprosy rascheta ekstremal'nykh snegovykh nagruzok na kupol'nye pokrytiya (Problem of calculation of extreme snow loads on the domed roofing), *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2005, Issue 7, pp. 39-42.
3. GOST 31385 - 2008. Rezervuary vertikal'nye tsilindricheskie stal'nye dlya nefi i nefteproduktov. Obshchie tekhnicheskie usloviya. (Vertical cylindrical steel storage tanks for oil and oil products). Moscow: FGUP "Standartinform", 2010. 53 p.
4. Karpilovskii V.S., Kriksunov E.Z., Malyarenko A.A., Mikitarenko M.A., Perel'muter A.V, Perel'muter M.A. Vychislitel'nyi kompleks SCAD (SCAD computer system). Moscow: "SCAD SOFT", 2009. 656 p.
5. Nekhaev G.A. Proektirovanie i raschet stal'nykh tsilindricheskikh rezervuarov i gazgol'derov nizkogo davleniya (Design and calculation of steel storage tank and a low-pressure gas holders). Moscow: ASV, 2005. 215 p.
6. SP 20.13330.2011. Nagruzki i vozdeistviya (Loads and impacts. Updated edition of SNiP 2.01.07 - 85*). Moscow: Ministry of regional development, 2010. 80 p.
7. Trofimovich V.V., Permyakov V.A. Optimizatsiya metallicheskiikh konstrukt-sii (Optimization of metal structures). Kiev: Vishcha shkola, 1983. 200 p.
8. Khanukhov Kh.M. Razvitie sistemy obespecheniya tsiklicheskoii prochnosti i promyshlennoi bezopasnosti stroitel'nykh svarnykh metallokonstrukt-sii (The evolution of system for ensuring cyclic strength and safety of construction of welded steel). PhD thesis. Moscow: UGTU-UPI, 2011. 68 p.