

УДК 622.693

**ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНОЙ СХЕМЫ ДВУХСЛОЙНОЙ
КУПОЛЬНОЙ КРЫШИ ДЛЯ РЕЗЕРВУАРОВ ВЕРТИКАЛЬНЫХ
СТАЛЬНЫХ**

**OPTIMISATION OF THE STRUCTURE OF A DOUBLE-LAYER ROOF
FOR VERTICAL CYLINDRICAL OIL TANKS**

Каравайченко М.Г., Окаб А.К.

**ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический
университет», г. Уфа, Российская Федерация, г. Ди Кар, Ирак**

M.G. Karavaichenko, A.K. Okab,

**FSBEI HPE “Ufa State Petroleum Technological University”,
Ufa, the Russian Federation, Dhi Qar Iraq**

e-mail: kmgnd@yandex.ru

Аннотация. Оптимальным вариантом конструктивной схемы двухслойной купольной крыши для РВС является схема с использованием модуля 3. Схема полученного модуля 3 для РВС с диаметром 60,7 м имеет следующие характеристики: высота модуля $h = 2100$ мм, минимальное количество узлов 1773, минимальное количество стержней 6772, максимальная деформация 23 мм, максимальное напряжение 22,8 Мпа. Собственный вес крыши при использовании модуля 3 является сравнительно наименьшим, кроме того, для ее сборки потребуется наименьшее количество стержней, при этом конструкция сохранит требуемую устойчивость к деформациям и обеспечит требуемый уровень безопасности при эксплуатации сооружения.

Авторами в данной работе проведен сравнительный анализ двухслойных купольных крыш с разными модулями. Для расчёта, анализа и оптимизации конструкции двухслойной крыши была использована программа SAP2000[1], применение которой дает возможность выбрать наиболее подходящие модули и снизить собственный вес конструкции, получив при этом наименьшие напряжения и деформацию крыши РВС. В результате представлен проект двухслойной купольной крыши для РВС большого диаметра (от 60 до 100 метров), который позволяет использовать конструкции без дополнительных опор, а также значительно снизить стоимость крыши, что является крайне актуальным в связи с продолжающейся тенденцией к укрупнению ёмкости РВС.

Разработаны однослойные купольные крыши большого диаметра, однако их существенными недостатками являются высокая стоимость и большой собственный вес конструкции.

Abstract. The best option constructive scheme for the two-layer dome roof PVC scheme is using the module 3. The scheme received the module 3 for PVC with a diameter of 60.7 m has the following characteristics: module height $h = 2100$ mm, the minimum number of nodes 1773 and 6772 the minimum number of bars, the maximum deformation of 23 mm, the maximum stress of 22.8 MPa. The dead weight of the roof module 3 using a relatively smallest addition to its required minimum number of assembly rods, while maintaining the desired design dimensional stability and provide the required level of security in the operation of the facility.

The authors in this study, a comparative analysis of two-layer dome roofs with different modules. For the calculation, analysis and optimization of the design of two-layer roof was used program SAP2000 [1], the application of which makes it possible to choose the most appropriate modules and to reduce its own weight of

the structure, while receiving the least stress and deformation of the roof of the PBC. As a result, a draft two-layer dome roof for PBC large diameter (60 to 100 meters), which allows the use of the design without additional supports, as well as significantly reduce the cost of the roof, which is extremely important due to the continuing trend towards consolidation capacity PBC.

Developed single-layer dome roofs of large diameter, but their significant drawback is the high cost and large own weight of the structure.

Ключевые слова: купольные крыши, нефтяные резервуары, деформация крыш, SAP 2000, стальные резервуары, узловые соединения.

Key words: dome roofs, oil tanks, roof deformation, SAP 2000 steel tanks, the nodal connections

Одной из наиболее актуальных задач является разработка прочных, лёгких и дешёвых крыш для перекрытия крупных резервуаров диаметром 60 м и выше. Известно, что переход от нефтяных резервуаров с небольшой единичной вместимостью, в том числе с коническими, сферическими и купольными крышами, на резервуары с большей единичной вместимостью, крыши которых представляют собой пространственные конструкции, даёт заметные преимущества по сравнению с классическими решениями в данной области, в частности, по экономическим и технологическим показателям.

Разработаны однослойные купольные крыши большого диаметра, однако их существенными недостатками являются высокая стоимость и большой собственный вес конструкции.

В данной работе проведен сравнительный анализ двухслойных купольных крыш с разными модулями. Для расчёта, анализа и оптимизации конструкции двухслойной крыши была использована программа SAP2000[2], применение

которой дает возможность выбрать наиболее подходящие модули и снизить собственный вес конструкции, получив при этом наименьшие напряжения и деформацию крыши РВС. В результате представлен проект двухслойной купольной крыши для РВС большого диаметра (от 60 до 100 метров), который позволяет использовать конструкции без дополнительных опор, а также значительно снизить стоимость крыши, что является крайне актуальным в связи с продолжающейся тенденцией к укрупнению ёмкости РВС.

Цель работы

Целью настоящей работы является оптимизация конструкции двухслойной купольной крыши для крупных нефтяных резервуаров с диаметром от 60 до 100 метров.

Для достижения цели необходимо решить многофакторную задачу.

Факторы, влияющие на выбор оптимальных конструктивных решений:

- минимальный собственный вес конструкции,
- минимальное количество требуемых стержней и узловых соединений,
- оптимальное расстояние между верхним и нижним слоями крыши, которое позволяет минимизировать напряжение в стержнях,
- минимальные напряжение и деформация в купольной крыше.

Конструктивные особенности

В данной работе подвергались анализу конструкции двухслойной крыши для резервуаров без центральной опоры (сферической). Стационарные крыши опираются на кольцевой элемент жесткости, стенки резервуара (распорная система) [3]. Данная схема резервуара показана на рисунке (1).

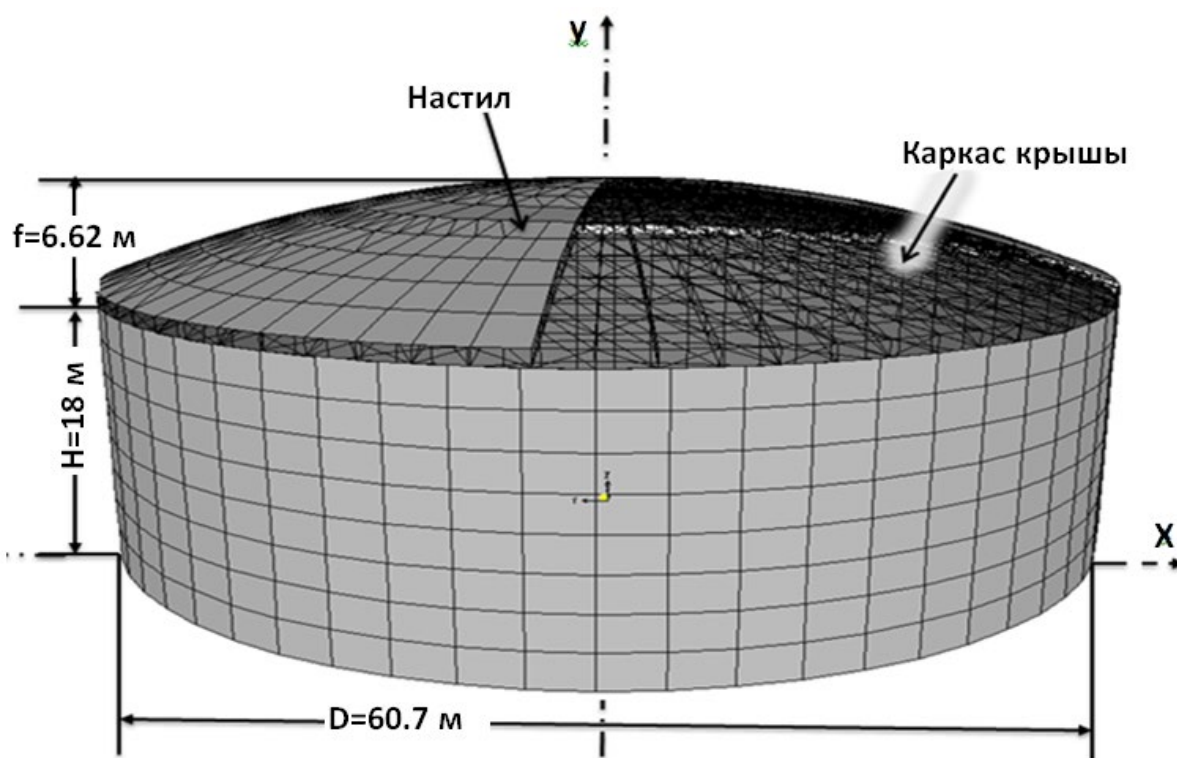


Рисунок 1. Резервуар с двухслойной купольной крышей

Напряженно-деформированное состояние несущих элементов купольной крыши определяется их пространственной работой, в свою очередь, для моделирования работы таких конструкций наиболее приемлемым является метод конечных элементов [4]. Расчет конструкции крыши производился при помощи программного комплекса, однако следует заметить, что при расчете параметров каркаса купольной крыши жесткость настила не учитывалась.

Каркас купольной крыши представляет собой пространственную систему, состоящую из набора стержней [5]. Соединение стержней между собой в узлах характеризуется как жесткое; соединение купольной крыши с опорной частью шарнирное.

Произведён расчёт нагрузок согласно (СП 20.13330.2011 нагрузки и воздействия СНиП 2.01.07-85) для V снегового района. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Нагрузки на крышу для V снегового района

Нагрузки, кПа	$C_{н1}$	$C_{н2}$	$C_{н3}$	$V_{т}$	σ^T
	3,6	5,35	4	-0,554	0,124

где $C_{н1}$, $C_{н2}$, $C_{н3}$, – снеговые нагрузки.

$V_{т}$ – ветровые нагрузки.

σ^T – температурные климатические воздействия.

Несущая конструкция купольной крыши резервуара выполнена в модульном исполнении заводского изготовления. Данная пространственная конструкция предварительно проанализирована с помощью программного обеспечения SAP2000, в котором указано неограниченное количество замеров для создания проекта крыши, с целью запустить первый цикл анализа. Усилия в элементах конструкции, полученные в результате реализации первого цикла анализа, пристально изучены, в результате чего выбраны размеры стержней, соответствующие данным усилиям, и введены новые входные данные до завершения цикла.

Этот повторяющийся процесс продолжался, пока разница в весе конструкции, полученная в результате двух соседних циклов не стала незначительна, поскольку практическое применение данного процесса дает оптимизацию структуры за счет снижения веса. В ходе исследования были определены следующие модули с оптимальной конструкцией: параллелепипед и правильные треугольная и четырехугольная пирамиды.

Рассмотрены три модели несущих конструкций, условно назовем их модуль 1, модуль 2 и модуль 3[6].

Геометрические характеристики модулей

Модуль 1 представляет собой прямоугольный параллелепипед, боковые грани которого снабжены четырьмя дополнительными диагоналями, соединяющимися друг с другом в четырёх узлах конструкции, как видно из рисунка 2.

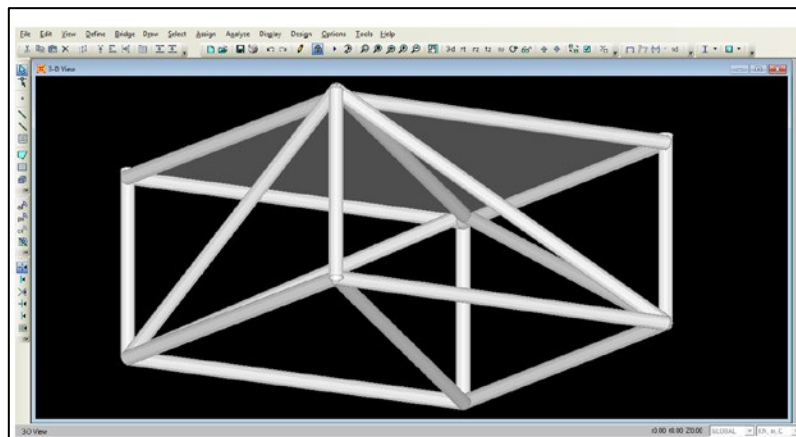


Рисунок 2. Модуль 1

Модуль 2 имеет вид перевернутой пирамиды, в основании которой лежит равносторонний треугольник, рисунок 3.

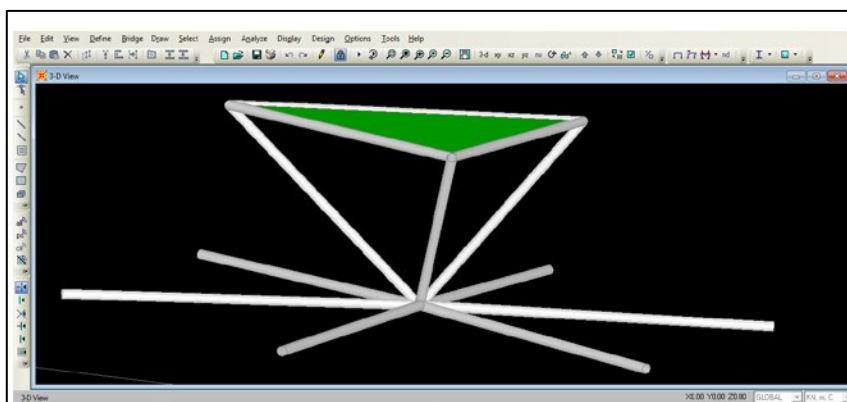


Рисунок 3. Модуль 2

Модуль 3 представляет собой перевернутую пирамиду, в основании которой лежит прямоугольник.

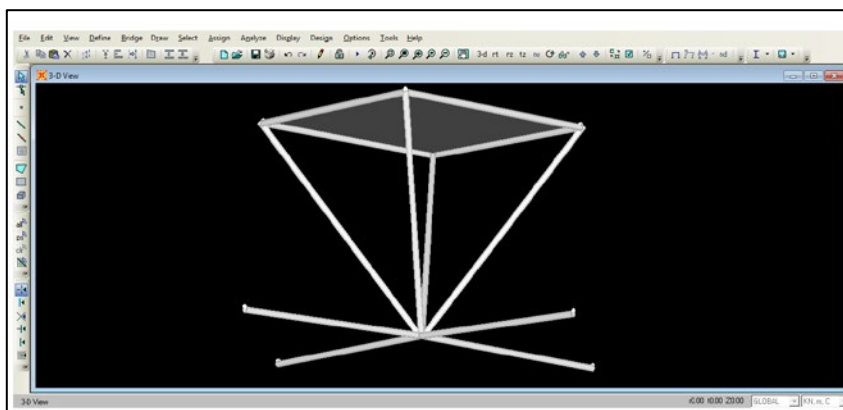


Рисунок 4. Модуль 3

Длина стержней верхнего слоя для модулей 1,2 и 3 одинакова и равна 2000 мм.

Обсуждения

Сравнительный анализ напряжения и собственного веса крыши по результатам численного эксперимента

Из рисунков (5,6,7), показывающих зависимость напряжения и собственного веса конструкции от расстояния между верхним и нижним слоями крыши, пересечение кривых показывает оптимальную высоту модуля h (расстояние между слоями крыши), результаты представлены в таблице 2.

На рисунке 5 можно заметить, что с уменьшением расстояния между решетками напряжение повышается, и как замечено на рисунке, максимальное напряжение, равное 292 МПа, приходится на тот момент, когда расстояние достигает 0,5 м. Оно начинает снижаться с увеличением расстояния между верхней и нижней решетками, при этом имеет место увеличение веса конструкции. Из рисунка видно, что оптимальная точка расположена на месте пересечения кривой напряжения и кривой веса, где расстояние равно 1,8 м, напряжение равно 199 МПа, и вес достигает 38 кг/м^2 .

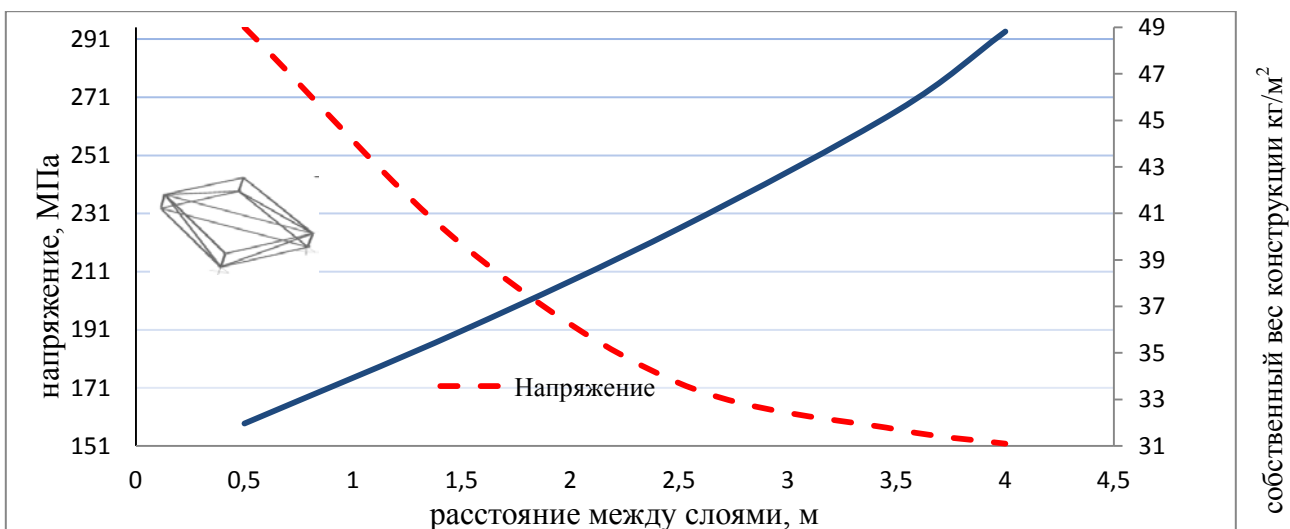


Рисунок 5. Графическая зависимость напряжения и веса конструкции от расстояния между слоями крыши (Модуль 1)

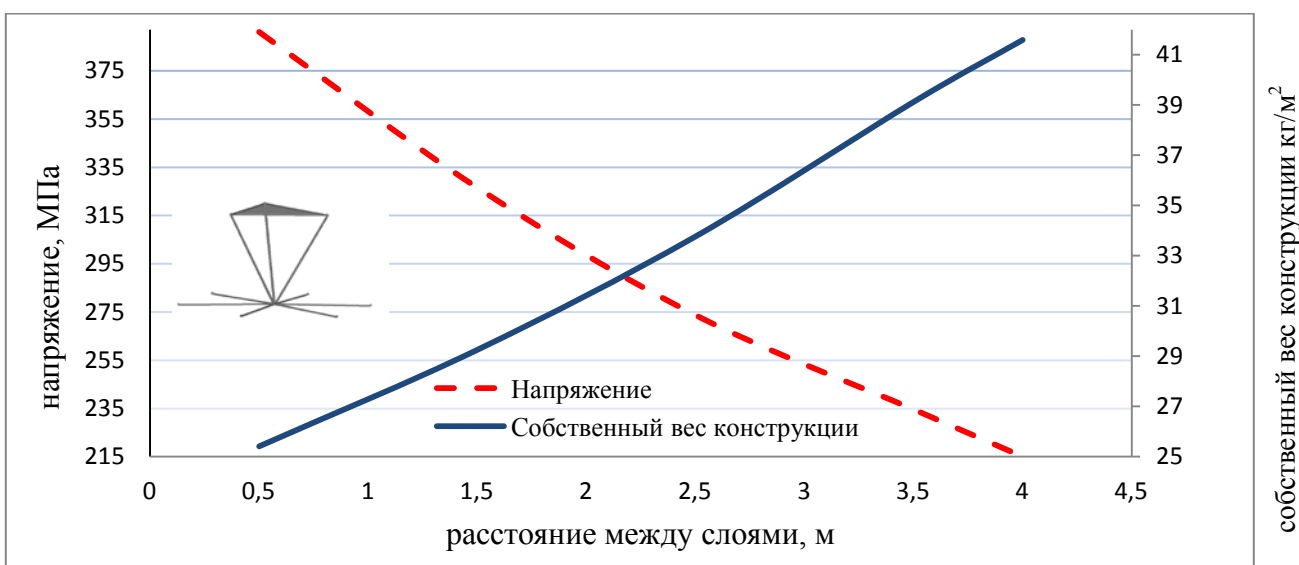


Рисунок 6. Графическая зависимость напряжения и веса конструкции от расстояния между слоями крыши (Модуль 2)

На рисунке (6) можно заметить, что с уменьшением расстояния между решетками напряжение повышается, и, как замечено на рисунке, максимальное напряжение, равное 380 МПа, приходится на тот момент, когда расстояние достигает 0,5 м. Оно также начинает снижаться по мере увеличения расстояния между верхней и нижней решетками, и можно заметить, что оптимальная точка расположена на месте пересечения кривой

напряжения и кривой веса, где расстояние равно 2,2 м, напряжение равно 285 МПа, и вес достигает 32,5 кг/м².

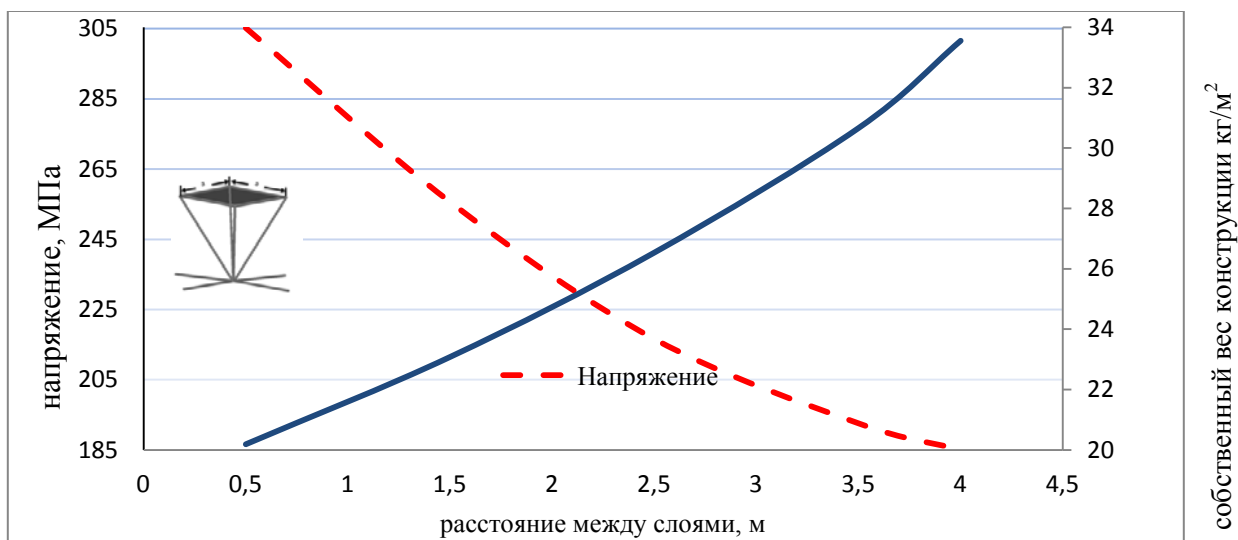


Рисунок 7. Графическая зависимость напряжения и веса конструкции от расстояния между слоями крыши (Модуль3)

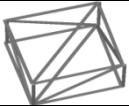

Как видно из рисунка (7), уменьшение расстояния между решетками приводит к повышению напряжения, и, как указано на рисунке, максимальное напряжение, равное 305 МПа, соответствует расстоянию между решетками, равному 0,5 м. В данном случае оптимальная точка расположена на месте пересечения кривой напряжения и кривой веса, где расстояние равно 2,1 м, напряжение равно 288 МПа, и вес достигает 25 кг/м².

Таблица 2. Оптимальная высота каждого модуля

Виды модулей	Оптимальное расстояние между слоями, м	Собственный вес несущей конструкции, кг/м ²	Напряжение сжатия в стержнях, МПа
	1,8	38	-200
	2,2	32.5	-285
	2,1	25	-228

Из таблицы видно, что в случае использования модуля 3 собственный вес конструкции составляет $1 \text{ м}^2 \approx 25 \text{ кг/м}^2$, при нагрузках для района V максимальное напряжение -228 МПа (отрицательные числа в данной таблице обозначают усилие сжатия), в то время как при использовании модуля 1 или 2 вес конструкции на каждый 1 м^2 перекрываемой поверхности существенно возрастает до 38 и $32,5 \text{ кг/м}^2$ соответственно. Как видно из таблицы 3, количество узлов и стержней в конструкции крыши меньше при использовании модуля 3, по сравнению с модулем 2, что является преимуществом для монтажа конструкции, поскольку требует меньше времени, кроме того, снижение количества узлов и стержней ведет к снижению стоимости крыши и стоимости ее сборки.

Таблица 3. Основные количественные характеристики трёх модулей для РВС с диаметром 60,7 м

Модули	Количество узлов	Количество стержней
	1675	7212
	2101	8790
	1773	6772

Как видно из таблицы (3), количество узлов и стержней в третьем случае (модуль 3) оптимально по сравнению с двумя другими конструкциями.

Сравнительная характеристика деформации

Как видно из рисунков 8, 9 и 10, наблюдается деформация крыши при воздействии собственного веса, и при комбинированном воздействии собственного веса и снеговой нагрузки. Однако, разница между значениями максимальной деформации модулей 1, 2 и 3 незначительна.

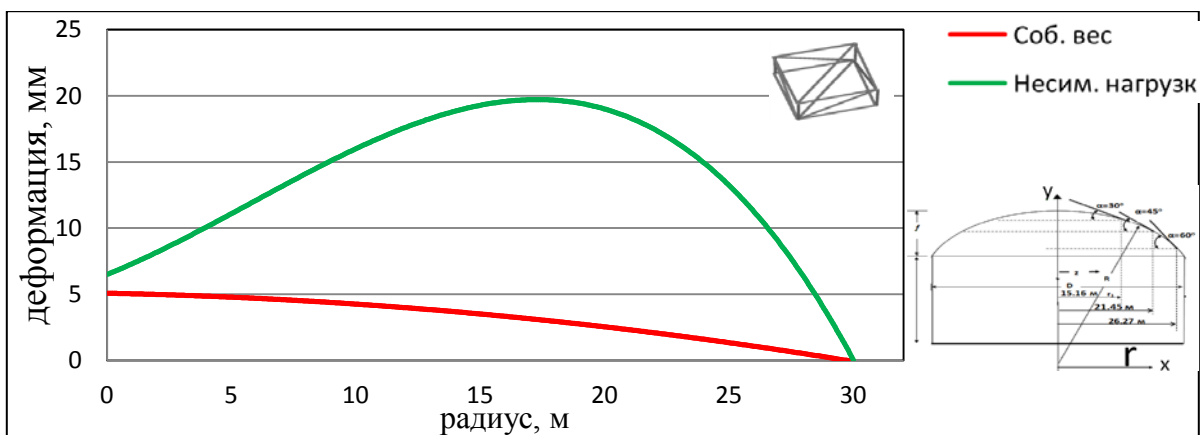


Рисунок 8. Деформация крыши (Модуль 1)

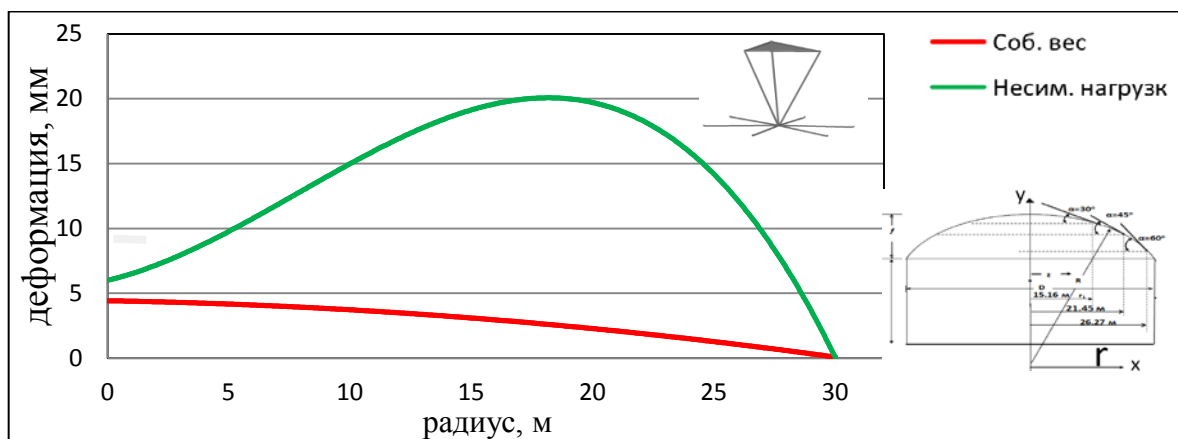


Рисунок 9. Деформация крыши (Модуль 2)

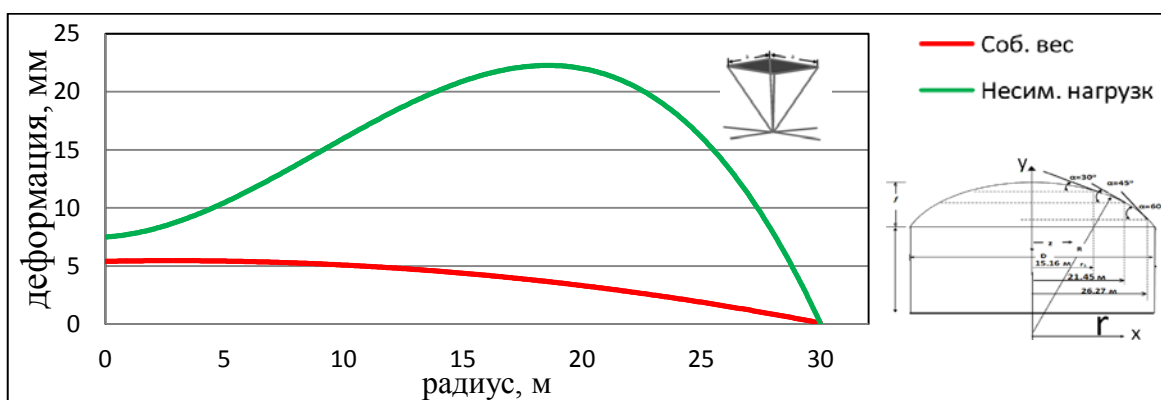


Рисунок 10. Деформация крыши (Модуль 3)

Обсуждение результатов

Сопоставив и проанализировав данные, представленные выше, можно прийти к заключению, что при использовании модулей третьего типа (модуль 3) совокупный вес купола диаметром 60,7 м равен 187 тонн, что преобразовывается в расход стали равный 25 кг/м^2 перекрывающей поверхности для создания каркаса без учёта настила, когда расстояние между слоями равно 2,1 м при использовании листа толщиной 5 мм массой $39,25 \text{ кг/м}^2$.

Замечено, что при отсутствии снеговой нагрузки максимальная деформация приходится на центр конструкции, постепенно снижаясь по мере увеличения расстояния от центра, в то время как при наличии снеговой нагрузки напряжение перераспределяется таким образом, что максимальная деформация приходится на участок, где расположен снег.

Поскольку в данной научной работе речь идёт именно о сооружениях, диаметр которых превышает 60 метров, ключевыми параметрами структурных покрытий являются собственный вес конструкции, высокая устойчивость, к различного рода деформациям, сбалансированное распределение напряжения по конструкции и минимальное возможное количество деталей при сохранении ключевых характеристик.

Выводы

Оптимальным вариантом конструктивной схемы двухслойной купольной крыши для РВС является схема с использованием модуля 3. Схема полученного модуля 3 для РВС с диаметром 60,7 м имеет следующие характеристики: высота модуля $h = 2100 \text{ мм}$, минимальное количество узлов 1773, минимальное количество стержней 6772, максимальная деформация 23 мм, максимальное напряжение 22,8 Мпа. Собственный вес крыши при

использовании модуля 3 является сравнительно наименьшим, кроме того, для ее сборки потребуется наименьшее количество стержней, при этом конструкция сохранит требуемую устойчивость к деформациям и обеспечит требуемый уровень безопасности при эксплуатации сооружения.

Список используемых источников

1 Sap2000® integrated finite element analysis and design of structures// Steel design manual. Computers and Structures, Inc. Berkeley, California, USA. Revision May 2000. 161 pp.

2 Сорочан Е.А. Справочник проектировщика. Основания, фундаменты и подземные сооружения. М.: Стройиздат, 1985.479 с.

3 Analysis, design and realization of space frames: a state-of-the-art report. //Bulletin of the International Association of Shell and Spacial Structures, Special Issue, 1984, 15 (84-85).

4 Chilton J. Space grid structures // Produced by Plant a tree. Great Britain, 2000.

5 Lyubomir A. Zdravkov. Dome roof of aboveground steel tank with $v=70000 \text{ m}^3$ capacity. Sofia: 1606, 2006.

References

1 SAP2000® Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures. Steel design manual. Computers and Structures, Inc. Berkeley, California, USA. Revision May 2000. 161 pp.

2 Sorochan E.A. Spravochnik proektirovschika. Osnovaniya, fundamentyi i podzemnyie sooruzheniya. M.: Stroyizdat, 1985.479 s. [in Russian].

3 Analysis, design and realization of space frames: a state-of-the-art report. Bulletin of the International Association of Shell and Spacial Structures, Special Issue, 1984, 15 (84-85).

4 Chilton J. Space grid structures // Produced by Plant a tree. Great Britain, 2000.

5 Lyubomir A. Zdravkov. Dome roof of aboveground steel tank with $v=70000 \text{ m}^3$ capacity. Sofia: 1606, 2006.

Сведения об авторах

About the authors

Каравайченко М.Г., д-р техн. наук, профессор, кафедры «Сооружение и ремонт газонефтепроводов и газонефтехранилищ» ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

M.G. Karavaichenko, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Chair “Construction and Maintenance of Oil and Gas Pipelines and Storage Tanks”, FSBEI HPE USPTU, Ufa, the Russian Federation

Окаб А.К., аспирант кафедры «Сооружение и ремонт газонефтепроводов и газонефтехранилищ» ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация; Ирак, Ди Кар университет

A.K. Okab, Post-graduate Student of the Chair “Construction and Maintenance of Oil and Gas Pipelines and Storage Tanks”, FSBEI HPE USPTU, Ufa, the Russian Federation; Iraq, Dhi Qar University

e-mail: abdullah_alumary@mail.ru