

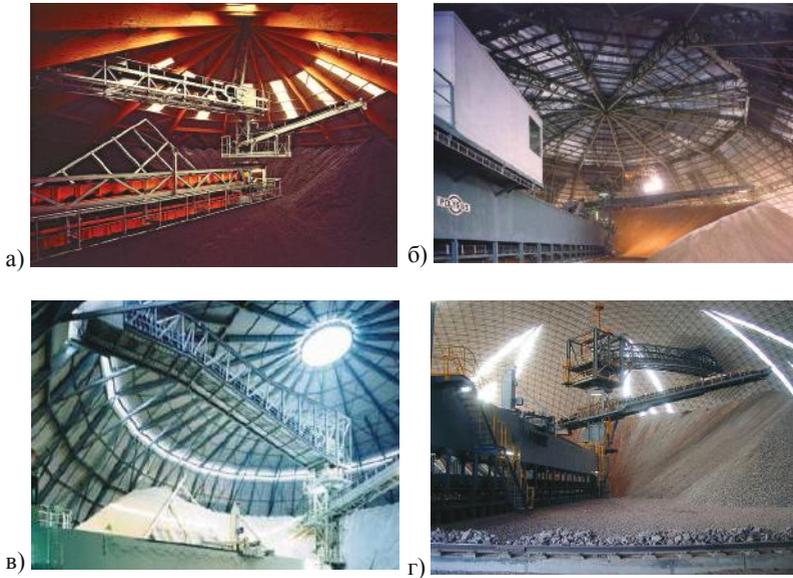
УДК 624.042

## ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОЙ КОНСТРУКТИВНОЙ СХЕМЫ КУПОЛА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ В СЕЙСМИЧЕСКОМ РАЙОНЕ

*к.т.н. Самойленко М.Е.*

*Донецкий ПромстройНИИпроект*

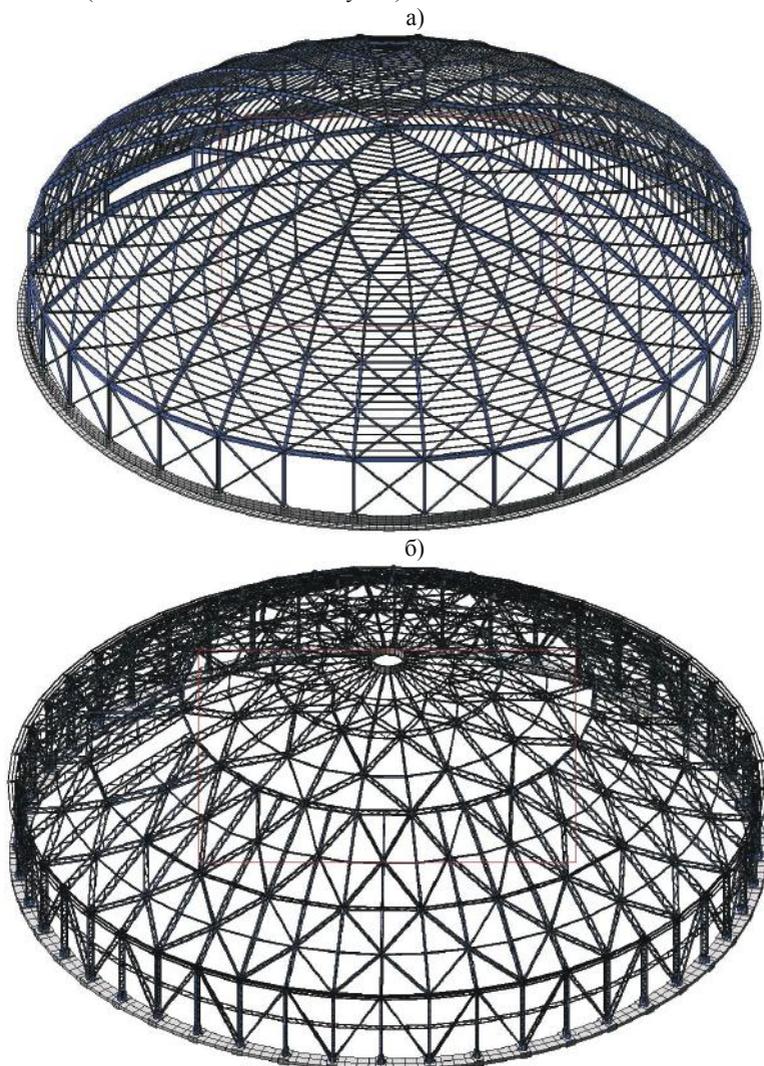
В современном промышленном производстве часто используются технологические схемы, предполагающие размещение технологического процесса в зданиях с купольным покрытием большого диаметра. Поскольку производство обычно размещают вблизи источников сырья часто отсутствует возможность выбора площадки строительства с простыми горно-геологическими условиями. В этой ситуации возникает необходимость выработать рациональные конструктивные решения сооружения, позволяющие удовлетворить технологические требования и одновременно обеспечить заданную надежность конструкции и ее оптимальную стоимость.



*Рис. 1. Конструктивные схемы куполов над усреднительными складами:  
а – ребристая; б – ребристо-кольцевая с ребрами решетчатого сечения; в –  
ребристо-кольцевая с ребрами сплошного сечения; г – сетчатая*

В настоящее время в Донецком ПромстройНИИпроекте ведутся работы по проектированию Цементного завода в Ленинском районе АР Крым (возле г. Керчь). Проектом предусмотрено возведение усреднительного склада основного сырья. Здание круглое в плане (диаметр 106,88 м) с купольным

покрытием. Купол имеет технологическое отверстие для пропуска галереи размером 8×5 м. Геометрические параметры здания определены техническим заданием (технолог – компания Polysius).



*Рис. 2. Конструктивные схемы куполов над усреднительными складами:  
а – ребристо-кольцевой с ребрами сплошного сечения из двутавров (I); б –  
ребристо-кольцевой с решетчатыми арками полигонального очертания из  
прямоугольных труб (II)*

Сейсмичность площадки более 8 баллов, амплитуда максимального ускорения  $A=3,21 \text{ м/с}^2$  (0,315g). Параметры сейсмичности получены по результатам сейсмомикрорайонирования площадки строительства. В основании присутствуют инженерно-геологические элементы (суглинки), обладающие просадочными свойствами (I тип грунтовых условий). Начальное просадочное давление – 0,113–0,132 МПа. Суммарная просадочная толща в районе расположения усреднительного склада основного сырья плавно изменяется в пределах 1,6–2,5 м.

В практике проектирования и строительства куполов над усреднительными складами сырья имеются примеры использования всех основных конструктивных схем куполов – ребристых, ребристо-кольцевых и сетчатых (рис. 1). Применение тех или иных технических решений при проектировании металлических конструкций обусловлено как технологическими возможностями предприятий изготовителей, так и предполагаемой технологией монтажа.

Для выбора рациональной конструктивной схемы сооружения были выполнены численные исследования напряженно-деформированного состояния, предварительное конструирование и определение массы металла для трех вариантов конструктивных решений купола. Анализировались те конструктивные схемы купола, которые могут быть выполнены украинскими изготовителями металлоконструкций.

I – Ребристо-кольцевой с ребрами сплошного сечения. Связи в каждой панели. Ребра, колонны, опорное кольцо – из сварных двутавров. Кольца и другие элементы – из прямоугольных труб (рис. 2, а).

II – Ребристо-кольцевой с решетчатыми арками полигонального очертания из прямоугольных труб. Связи, колонны, кольца – решетчатые из прямоугольных труб (рис. 2, б).

III – Ребристый с ребрами сплошного сечения и одной точкой перелома ребер. Ребра, колонны, опорное кольцо – из сварных двутавров. В местах перелома ребер введены затяжки.

Исследования напряженно-деформированного состояния конструкции показали, что учет податливости основания существенно снижает изгибающие моменты на обрезах фундамента, что позволяет более рационально проектировать базы колонн и сам фундамент. Моменты снижаются в значительной степени за счет уменьшения сейсмической составляющей усилия в колоннах. В то же время в арках купола усилия изменяются незначительно. На рис. 3, 4 приведены результаты расчета усилий в элементах купола с решетчатыми арками полигонального очертания из прямоугольных труб для нескольких моделей основания:

- жесткая заделка колонн в основании;
- кольцевой фундамент шириной 2,5 м, коэффициент постели  $C=3000 \text{ т/м}^3$ ;
- то же  $C=1500 \text{ т/м}^3$ .

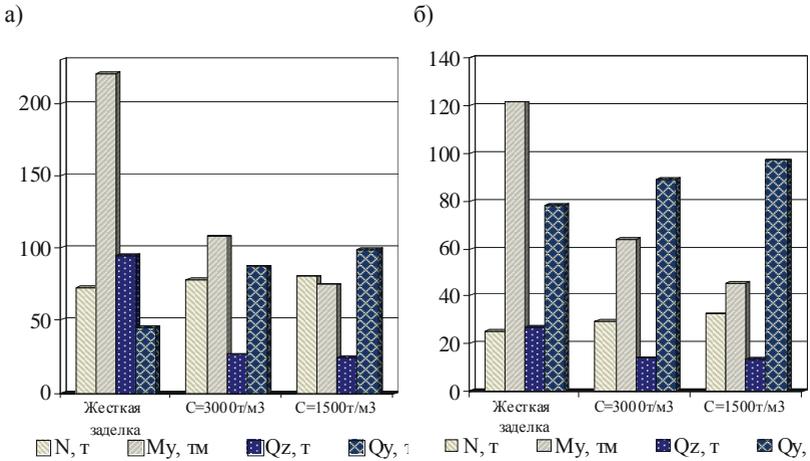


Рис. 3. Усилия на обрезе фундамента сооружения при различных жесткостях основания: а – РСУ; б – усилия от сейсмики

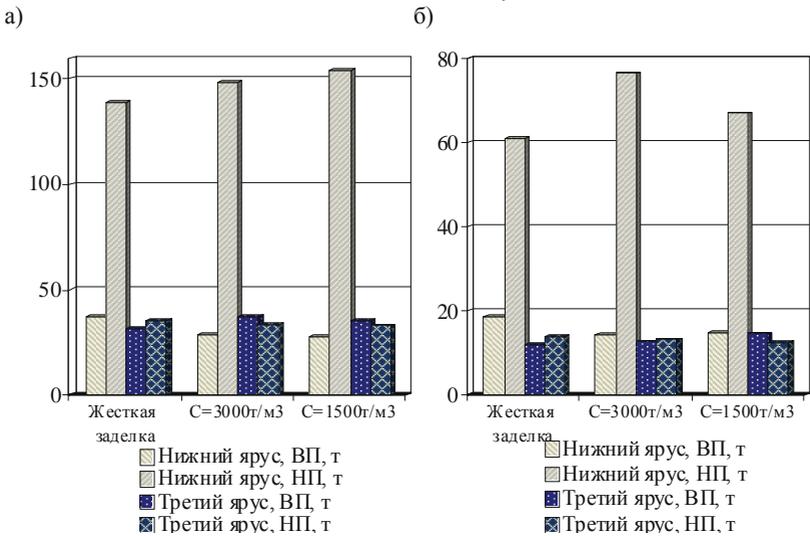


Рис. 4. Продольные силы в поясах арок (ребер) купола при различных жесткостях основания: а – РСУ; б – усилия от сейсмики

Анализ различных конструктивных схем фундаментов купольного сооружения показал, что наиболее рациональным решением в условиях сейсмики является кольцевой фундамент неглубокого заложения с

горизонтальным швом скольжения. Такой фундамент обладает достаточной жесткостью в горизонтальной плоскости и сдерживает возможные большие взаимные перемещения колонн купола при сейсмическом воздействии. Шов скольжения существенно снижает сейсмические усилия в куполе (до значений, сопоставимых с ветровой нагрузкой).

Из табл. 1 видно, что самую низкую теоретическую металлоемкость имеет ребристо-кольцевой купол с решетчатыми арками полигонального очертания (II). Масса ребристо-кольцевого купола с ребрами сплошного сечения из двутавров (II) несколько выше. Ребристый купол с одной точкой перелома ребер (III) имеет существенно большую металлоемкость, что связано с развитием сечения ребер для восприятия больших изгибающих моментов в ребрах ломаного очертания. На основании результатов исследований в проекте усреднительного склада была принята ребристо-кольцевая схема купола с решетчатыми арками полигонального очертания из прямоугольных труб. Схема купола показана на рис. 5.

Таблица 1

Теоретическая металлоемкость исследуемых типов куполов

№ п.п.	Конструктивная схема	Масса конструкции (без учета прогонов), т	Расход стали, кг/м <sup>2</sup>	Соотношение металлоемкости, %
I	Ребристо-кольцевой с ребрами сплошного сечения из двутавров	583,5	64,9	108%
II	Ребристо-кольцевой с решетчатыми арками полигонального очертания из прямоугольных труб	539,5	60,0	100%
III	Ребристый с ребрами сплошного сечения из двутавров и одной точкой перелома ребер	745,0	82,9	138%

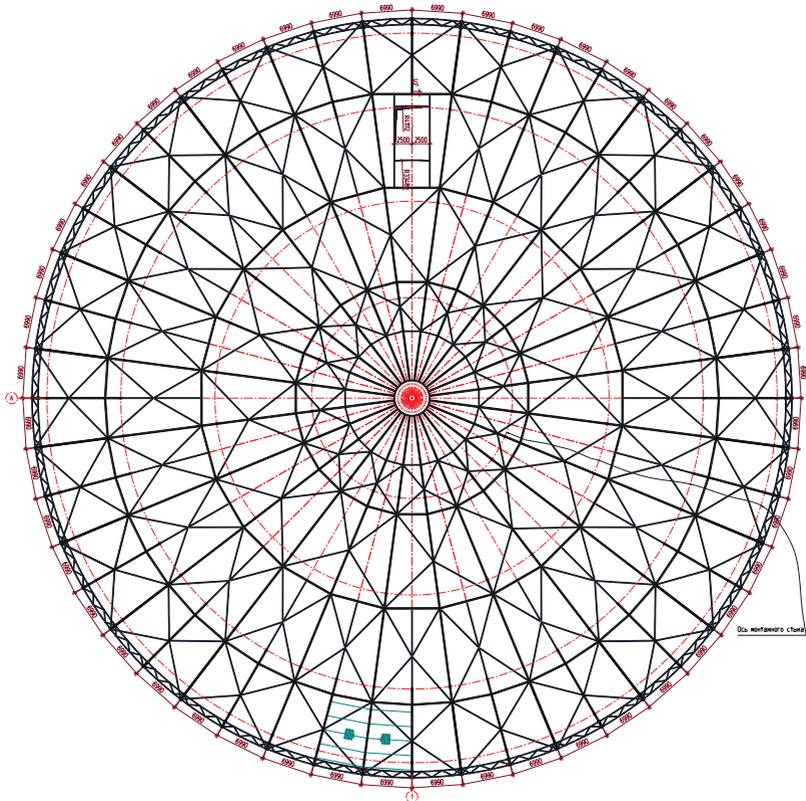
Фактическая металлоемкость запроектированного сооружения оказалась существенно больше (на 50%) вычисленной на этапе предварительной оценки. Указанное увеличение связано с рядом факторов:

1. Ограниченность типоразмеров замкнутых профилей, фактически выпускаемых на Украине. Необходимость унификации сечений. Как следствие – неоправданно большая масса отдельных элементов, подбираемых не по прочности, а по гибкости и устойчивости (например, отдельные связевые фермы).

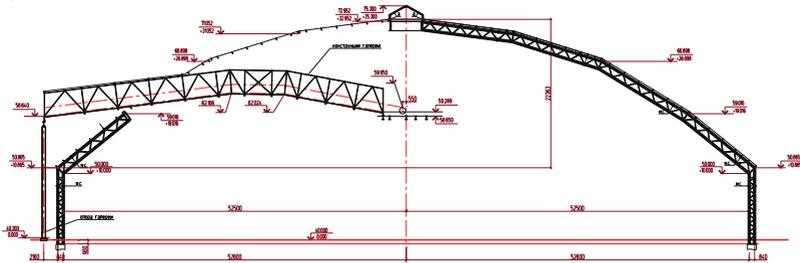
2. Невозможность в условиях реального производства металлоконструкций на Украине выполнить легкие и компактные узлы стыковки отдельных элементов замкнутого сечения и конструкций в целом (при условии, что элементы сопрягаются в пространстве под разными углами). Необходимость обеспечить конструктивные требования выполнения узлов и соединений квадратных труб, оговоренные нормами. Вследствие этого масса отдельных фасонки в узлах примыкания связевых ферм составляет около 50 кг, а масса всей листовой стали для оформления узла – до

200 кг.

3. Большой вес баз колонн из прямоугольных труб.



а)



б)

Рис. 5. Схема купола, принятая в проекте:  
а – план по верхним поясам ферм; б – разрез по оси входящей галереи

Структура фактической металлоемкости запроектированного сооружения для различных конструктивных элементов, типов профилей и классов стали показана на рис. 6. Полный вес металлических конструкций купола – 811,5 т. Приведенный расход стали – 90 кг/м<sup>2</sup>. Обращает на себя внимание большая масса связевых ферм и большой расход листовой стали. Указанные особенности объясняются причинами, изложенными выше. Таким образом, фактическая масса ребристо-кольцевого купола с решетчатыми арками из прямоугольных труб существенно выше теоретической и выше массы купола с ребрами сплошного сечения из сварных двутавров.

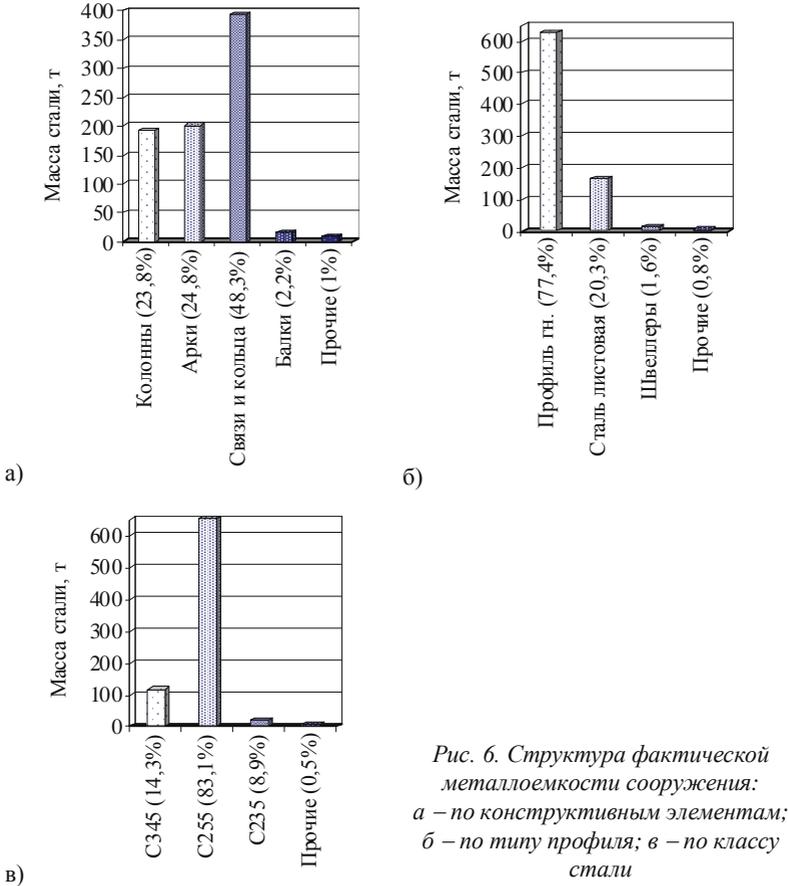


Рис. 6. Структура фактической металлоемкости сооружения:  
 а – по конструктивным элементам;  
 б – по типу профиля; в – по классу стали

Конструкция с арками из сварных двугавров позволяет сформировать достаточно простые, компактные и несложные в исполнении узлы сопряжения арок, колец и связей купола. А сама идея сварных сечений подразумевает возможность создания сечений практически оптимальных с точки зрения прочности, жесткости и устойчивости элемента. Следовательно, можно утверждать, что фактическая масса купола с ребрами сплошного сечения будет отличаться от полученной на стадии сравнительного анализа существенно меньше, чем масса конструкции с решетчатыми арками. Поэтому фактическая металлоемкость и экономическая эффективность купола с ребрами и колоннами сплошного сечения из двугавров и связями из квадратных труб будет не хуже, чем у конструкции с решетчатыми арками и связями.

### **Выводы.**

Для изучения поведения под нагрузкой конструкции купола усреднительного склада  $d=106,88\text{м}$  и выбора рационального конструктивного решения был выполнен численный эксперимент, в котором исследовалось три типа конструктивных схем куполов.

Динамические свойства конструкции при работе в сейсмической зоне, ее напряженно-деформированное состояние в значительной мере определяются параметрами основания и способом фундаментирования сооружения. Наиболее экономичным и надежным типом фундамента склада является кольцевой фундамент неглубокого заложения с горизонтальным швом скольжения.

Анализ металлоемкости сооружения показал, что наиболее рациональной конструктивной схемой является ребристо-кольцевой купол с решетчатыми арками полигонального очертания и ребристо-кольцевой купол с ребрами сплошного сечения из двугавров. Фактическая металлоемкость запроектированного купола с решетчатыми арками оказалась существенно больше вычисленной на этапе предварительной оценки, что связано с ограниченностью номенклатуры замкнутых профилей и невозможностью в условиях реального производства металлоконструкций на Украине выполнить легкие и компактные узлы стыковки отдельных элементов замкнутого сечения.

### **ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. ДБН В.1.1-12:2006 Строительство в сейсмических районах Украины. – К.: Минстрой Украины, 2006.
2. ДБН В.1.2-2:2006 Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования. – К.: Минстрой Украины, 2006.
3. СНиП 2.02.01-83\*. Основания зданий и сооружений. – Москва: ЦИТП Госстроя СССР, 1985г.
4. СНиП II-23-81\*. Стальные конструкции/ Госстрой СССР. - М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1991.