

УДК 624.074.7

О.М.ПУСТОВОЙТОВА, канд. техн. наук, С.Ю.НАБОКА

*Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н.Бекетова*

## **РАСЧЕТ КУПОЛЬНЫХ СТЕРЖНЕВЫХ СООРУЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА РАСЧЕТА**

Рассмотрены методы определения напряжённо-деформированного состояния сложных систем и инновационные подходы к процессу проектирования сооружений. Выявлена и обоснована необходимость использования энергетического критерия и теории напряжённо-деформированного состояния при подборе надежных и экономических сечений элементов купольных конструкций.

Розглянуто методи визначення напружено-деформованого стану складних систем та інноваційні підходи до процесу проектування споруд. Виявлена і обґрунтована необхідність використання енергетичного критерію та теорії напружено-деформованого стану при підборі надійних і економічних перерізів елементів купольних конструкцій.

The methods of determination of the tensely-deformed state of the difficult systems and innovative going are considered near the process of the civil engineering. The necessity of sharing of power criterion and theory of the tensely-deformed state is educed and reasonable at the selection of reliable and economical sections of elements of dome constructions.

*Ключевые слова:* метод адаптивной эволюции, напряжённо-деформированное состояние, энергетическая составляющая.

Купольные стержневые сооружения – сложные технические системы взаимодействующих строительных элементов, позволяющие не ограничивать творческий потенциал архитектора в создании различных архитектурных форм. Переход от возможности осуществления замыслов архитектора к практическому проектированию неизбежно приводит к необходимости использования инновационных методов расчета способствующих созданию порогов необходимых надежности и экономичности.

Развитие конструктивных форм стимулируется совершенствованием вычислительной и экспериментальной техники, а также прогрессом механики и математики в разработке новых математических методов анализа, оптимизации и синтеза конструкций на современных и перспективных ЭВМ.

Работы многих ученых были направлены на создание методов расчета купольных стержневых конструкций [1,2]. Однако эти методы не предусматривают решения такой задачи проектирования, как учет ресурсов материалов путем варьирования их композиции и формы самой конструкции, и также энергетической составляющей.

Конструирование должно быть направлено на минимизацию внутренней потенциальной энергии деформации, накапливаемой в сооружении от его собственного веса, усилий регулирования напряжен-

ного состояния и внутренних остаточных напряжений, возникших при изготовлении конструкций, всеми несущими элементами всех его конструктивных форм в сумме при всех возможных сочетаниях постоянных и временных нагрузок и воздействий. Энергетический критерий рационального проектирования был описан в работе Ю.А. Климова и В.С. Шмуклера [3]. Предлагаемый метод построения рациональных систем, в том числе и каркасных, предполагает формирование итерационных процедур, с помощью которых пошагово проводится улучшение соответствующих геометрических и (или) физико-механических параметров конструктива.

Потенциальная энергия системы в положении устойчивого равновесия достигает абсолютного минимума по перемещениям в функциональном пространстве, расширенном за счет полей функций конфигурации и (или) модулей упругости материала. В [3] предлагается выбирать из всего множества возможных значений искомых параметров такие, при которых потенциальная энергия деформаций (ПЭД) достигает нижней границы, то есть

$$U = \inf U^k, k = 1, 2, \dots,$$

где  $U$  – потенциальная энергия деформации системы,  $k$  – номер варианта.

Это происходит при приобретении конструкцией максимальных жесткостных показателей, так что в точке стационарности функционал имеет минимакс – минимум по функциям перемещений максимумов по функциям конфигурации и (или) модулей упругости материала.

Как пример использования данного метода была рассмотрена сложная, пространственно стержневая система – купольное покрытие пролётом 19,5 метров и высотой 8,75 метра (рис. 1).

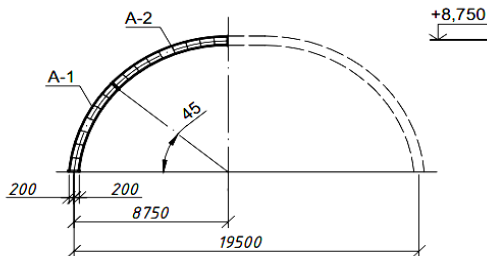


Рис. 1 – Схема купола, разбивка полуарки на сегменты

Несущая конструкция ребристого купола представляет собой систему радиальных полуарок – ребер (состоящие из сегментов А-1, А-2), которые соединяются между собой сверху верхним кольцом. Полуарки

составного сечения из двух швеллеров [ №12, а также из соединительных пластин 120х6 (рис. 2). В нижней части ребра опираются на нижнее опорное кольцо, которое воспринимает распорные усилия полуарок. На фундамент купола передаются только вертикальные нагрузки.

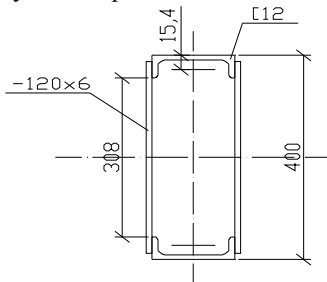


Рис. 2 – Конструкция сквозной полуарки

Для сравнения была рассмотрена купольная конструкция с изменённым параметром – сокрушенностью, однако все нагрузки остались прежними, кроме собственного веса, он изменится в зависимости от изменения геометрии конструкции, выполнены из одного и того же материала и тех же прокатных профилей (рис. 3).

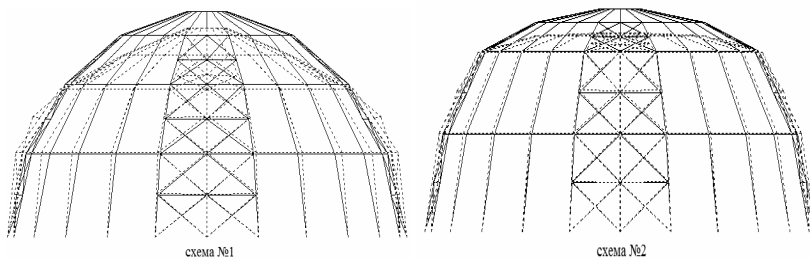


Рис. 3 – Схемы купольных покрытий

Основой расчёта был расчёт энергии куполов и прогибы стержней, учитывая, что рассматривалась рациональная система, был также проведён расчёт расхода материала, при этом использовались следующие формулы:

$$U = \sum \frac{N^2 \cdot L}{2EA}; \quad F = \frac{N_i \bar{N}_l}{EA_i} l_i,$$

где  $U$  – потенциальная энергия при внешних параметрах,  $F$  – прогибы.

Так же при расчёте определялось как изменится площадь стержней от внутренних параметров ( $e_u$  – предельная плотность энергии деформаций)

$$A_{i+1} = A_i \left( \frac{e_i}{e_u} \right); \quad e_i = \frac{\sigma^2}{2E};$$

$$e_u = 0,5 \chi_\varepsilon^2 [(\chi_\varepsilon + 1)e_{bcu} - (\chi_\varepsilon - 1)e_{btu}] - (1 - \chi_\varepsilon^2)e_{bshu}.$$

Учитывая тот факт, что ППЭД не является постоянной величиной, а зависит от вида напряженного состояния, считается целесообразным для ее определения приближенный подход. Вид напряженного или деформированного состояния учитывается с помощью параметров  $\chi_\sigma$  и  $\chi_\varepsilon$  Надаи-Лоде. В описанном расчёте использовался параметр Надаи-Лоде вида деформированного состояния:

$$\chi_\varepsilon = \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1} = 1;$$

$$e_{bcu} = e_{btu} = 0,5 \cdot R_y^2 \cdot E^{-1}; \quad e_{bshu} = 0,625 \cdot R_y^2 \cdot E^{-1}.$$

Значения усилий в стержнях рассматриваемых куполов получены при помощи программа SCAD (таблица).

Усилия и напряжения(от суммарной нагрузки)

Минимакс усилий и напряжений										
Наименование	Номер сечения	Номер загрузки	Максимальные значения				Минимальные значения			
			Значение				Значение			
			Номер эл-та	№ 1	Номер эл-та	№ 2	Номер эл-та	№ 1	Номер эл-та	№ 2
$N$	1	3	122	7.54236	168	11.5986	202	-29.348	363	-44.223
$M_k$	1	1	258	.003568	350	.007783	31	-.0039	372	-.00753
$M_y$	1	3	1	4.08258	24	5.14242	6	-2.8456	282	-5.6333
$Q_z$	1	3	63	3.85395	282	5.36375	68	-2.1544	24	-2.266
$M_z$	1	3	212	2.21202	289	1.27996	2	-0,5151	351	-4.179
$Q_y$	1	1	2	0.23175	389	0.53215	7	-0.1623	382	-0.5132

Анализ численных результатов исследований показал, что более нагружена схема № 2, следовательно она более подвержена деформациям (рис. 4).

При рассмотрении двух систем купольного покрытия, отличающихся между собой геометрической формой, и имеющих одинаковое загрузке, стало ясно, что с точки зрения max и min значений усилий более рациональной является схема № 1 ( $N_{\max \text{ № 1}} = 7,54236 \text{ кН} <$

$< N_{\max \text{ № } 2} = 11,5986 \text{ кН}; N_{\min \text{ № } 1} = -29,348 \text{ кН} < N_{\min \text{ № } 2} = -44,223 \text{ кН}$ ). При рассмотрении энергетической составляющей различия энергетического баланса не столь велики, окончательное решение о принятии рациональной системы всё же будет на основе деформаций и усилий, учитывая, что в схеме № 1 они меньше, принимаем как наиболее рациональную именно эту схему.

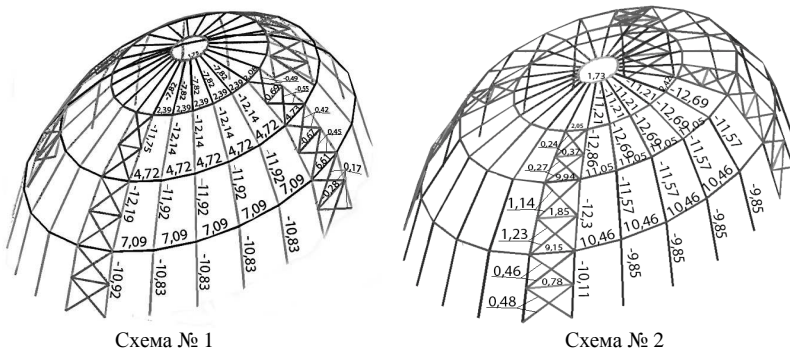


Рис. 4 – Распределения усилий от постоянной нагрузки, на примере основных стержней

При исследовании куполов каждый анализируемый вариант имел свои «плюсы» и «минусы», при этом для получения оптимального проекта купола при заданной геометрии разработана методика решения задачи об оптимальном выборе купола из условий прочности и местной устойчивости с использованием итерационного метода. Анализ проведенных расчетов по данной методике показывает, что применение итерационного метода с дискретными переменными позволяет эффективно решать проектные задачи.

1. Васильков И.В. Эволюционные задачи строительной механики. Синергетическая парадигма. – Ростов-на-Дону: Инфосервис, 2003. – 364 с.
2. Городецкий А.С., Шмуkler В. С., Бондарев А.В. Информационные технологии расчёта и проектирования строительных конструкций. – Х.: НТУ «ХПИ», 2003. – 889 с.
3. Шмуkler В.С., Климов Ю.А., Бурак Н.П. Каркасные системы облегченного типа. – Х.: Золотые страницы, 2008. – 336 с.
4. Юрьев А.Г. Генетические алгоритмы оптимизации строительных конструкций / А.Г. Юрьев, С.В. Клоев // Образование, наука, производство и управление в XXI веке: сб. докл. Междунар. науч. конф. – Старый Оскол, 2004. – Т. 4. – С. 238-240.
5. Шмуkler В.С., Какшар Ф., Вассим И. Рационализация параметров неоднородной балки-стенки // Науковий вісник будівництва. – Х.: ХО АСУ, 2004. – С. 202-213.

*Получено 29.10.2013*