

УДК 624.074.5

## **Влияние жесткости отдельных элементов на поведение металлических ребристо-кольцевых куполов**

**Сиянов А.И.,** к.т.н.

Винницкий национальный технический университет, Украина

**Анотація.** Програмними засобами ПК ЛІРА побудовані моделі, проведений розрахунок і виконана оцінка впливу жорсткості окремих елементів на поведінку металевих ребристо-кільцевих куполів. Розглянуті покриття з фіксованою стрілою підйому і змінним діаметром у плані. Описаний характер роботи досліджуваних конструкцій від дії власної ваги і від сумісного впливу власної ваги і прикладеного експлуатаційного навантаження. Викладені чинники, що впливають на параметри напружено-деформованого стану, і встановлені закономірності в поведінці покриттів. Виявлений ступінь завантаженості меридіональних і кільцевих елементів залежно від геометрії конструкцій і діючого навантаження.

**Аннотация.** Программными средствами ПК ЛИРА построены модели, произведен расчет и выполнена оценка влияния жесткости отдельных элементов на поведение металлических ребристо-кольцевых куполов. Рассмотрены покрытия с фиксированной стрелой подъема и изменяемым диаметром в плане. Описан характер работы исследуемых конструкций от действия собственного веса и от совместного влияния собственного веса и приложенной эксплуатационной нагрузки. Изложены факторы, влияющие на параметры напряженно-деформированного состояния, и установлены закономерности в поведении покрытий. Выявлена степень загруженности меридиональных и кольцевых элементов в зависимости от геометрии конструкций и действующей нагрузки.

**Abstract.** With the use of software PC LYRA some models have been built. The analysis and assessment of effects due to rigidity influence of individual elements, acting on behavior of metallic ribbed and circular domes was carried out. The roof systems with fixed rise and variations of diameter in plan were under consideration. The characteristic features in behavior of the structures under investigation due to own weight action and joint effect from own weight as well as operating load to be applied were reviewed too. Important factors, influencing on parameters of stress-and-strain state with determination of regularity in the roof system behavior are presented. In addition a degree of loading in meridional and circular elements depending upon geometry of the structures and exerted load is described.

**Ключевые слова:** металлические ребристо-кольцевые купола, моделирование, расчет, численные исследования, параметры напряженно-деформированного состояния.

**Описание проблемы в общем виде и ее связь с важными практическими заданиями.** Удивительная архитектурная форма ребристо-кольцевых куполов [1], использующихся в качестве покрытий зданий и сооружений, всегда привлекала потенциальных заказчиков.

Известны случаи, когда на основании сравнительных технико-экономических оценок разных, но круглых в плане типов пространственных конструкций выбор оставался за ребристо-кольцевым куполом. Как правило, подобные решения принимались исходя из опыта расчета, проектирования, строительства и эксплуатации отличающихся по размеру и форме ребристо-кольцевых куполов. Их преимущественные особенности в части совместной работы пересекающихся меридиональных (реберных) и кольцевых элементов, позволяющих обеспечить максимально полное использование прочности материала; зрелищность конструктивного решения, отвечающего современным представлениям об уникальности строительных объектов; возможность получения участков, способствующих созданию верхнего и бокового природного освещения, реализующегося через пространство под куполом, играли достаточно важную и часто решающую роль во время анализа интересных и заслуживающих внимания пространственных покрытий.

**Краткий анализ последних исследований и публикаций, в которых положено начало решению данной проблемы и на которые ссылается автор.** В настоящее время уже накоплен значительный опыт использования всевозможных по размеру (от сравнительно малых до поистине огромных) ребристо-кольцевых куполов в практике строительства зданий и сооружений различного назначения [2]. Основное применение они получили для покрытий как ранее возведенных, так и вновь запроектированных или уже строящихся религиозных храмов, торговых комплексов, культурных центров, банков, объектов частного сектора, а также при восстановлении старых, хотя и получивших физический износ, но не потерявших своего значения, исторических построек. Причем практически для каждого нового объекта необходимо выполнять большой объем работ по выбору рационального конструктивного решения пространственного покрытия.

**Выделение нерешенных вопросов, которым посвящается работа.** Как свидетельствует практика строительства, ребристо-кольцевые купола используются чаще всего в качестве большепролетных конструкций [1 – 5], состоящих из множества совместно работающих элементов. Однако заметим, что независимо от геометрии конструкции и ряда других, в большей степени сопутствующих факторов, очевиден различный вклад в работу покрытия отдельных элементов.

**Формулирование целей работы.** Имея на данный момент в распоряжении современные программные продукты, разработанные как отечественными, так и зарубежными специалистами, появляется реальная возможность с большей степенью точности и достоверности выполнить моделирование и расчет характерных геометрических форм ребристо-

кольцевых куполов. Полученные таким образом результаты можно смело использовать для определения степени загруженности каждого элемента пространственного покрытия. Особый интерес в данном случае представляют конструкции разного диаметра, но с фиксированной стрелой подъема. Следуя этому принципу, можно получить ряд закономерностей, имеющих важный прикладной и практический характер.

Наиболее показательными ребристо-кольцевыми куполами, с точки зрения максимального включения в работу всех элементов, являются те из них, которые сильно уязвимы от действия приложенной эксплуатационной нагрузки.

Отмеченное обстоятельство в первую очередь характерно для ребристо-кольцевых куполов со сравнительно небольшой стрелой подъема.

Исходя из этого, в работе рассмотрено несколько вариантов покрытия, позволяющих перекрывать наиболее распространенные пролеты.

В качестве прикладного программного продукта использовался ПК ЛИРА, с помощью которого выполнялось построение и расчет компьютерных моделей ребристо-кольцевых куполов.

**Изложение основного материала исследования с обоснованием полученных научных результатов.** Стрела подъема (высота) и количество секторов покрытия принимались одинаковыми. Изменялся только диаметр и, соответственно, размер ячеек пространственных конструкций. Причем, для оценки степени влияния расстояния между узлами количество ячеек с увеличением диаметра принималось как постоянным (рис. 1), так и изменяемым (рис. 2).

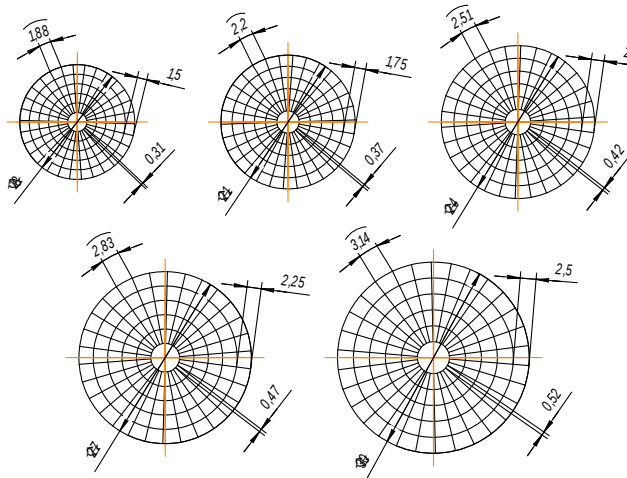


Рис. 1. Схемы куполов с постоянным количеством ячеек

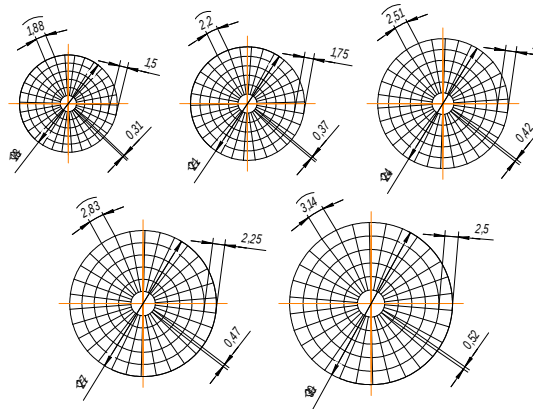


Рис. 2. Схемы куполов с изменяемым количеством ячеек

Формы ребристо-кольцевых куполов создавались с помощью поверхностей вращения, используя стержневые конечные элементы (рис. 3).

Заружение 1

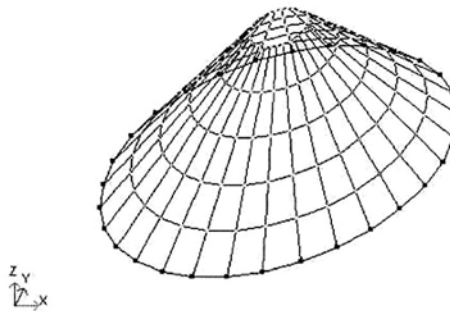


Рис. 3. Конечно-элементная модель ребристо-кольцевого купола

Каждое покрытие воспринимало сосредоточенные нагрузки, которые определялись посредством вычисления грузовых площадей и использования формулы трапеции с учетом условно принятой величины равномерно распределенной нагрузки ( $0,2 \text{ т/м}^2$ ).

Крепление пространственных конструкций осуществлялось в местах пересечения нижнего кольца с меридиональными элементами. Связи в опорных узлах назначались из условия геометрической неизменяемости и минимизации параметров, определяющих поведение куполов.

Формирование компьютерных моделей предусматривало назначение элементам приемлемых профилей. Характеристики жесткости определялись на основании выбранного замкнутого сечения элементов.

В качестве фиксированного габаритного параметра принималась высота  $H$  пространственных конструкций, которая составляла 10 м. Диаметр  $D$  покрытий варьировался в пределах 18...30 м с шагом 3 м.

Разумеется, указанный диапазон диаметра покрытий отвечал сравнительно небольшим пролетам, однако он находился в тех границах, которые позволяли определить общие закономерности поведения конструкций от действия нагрузок.

Материал элементов подбирался исходя из опыта проектирования и строительства ребристо-кольцевых куполов. Учитывая отсутствие привязанности к каким-либо особым требованиям, предложено использовать сталь наиболее распространенной марки (ВстЗпс).

Количество секторов для всех рассматриваемых покрытий принято 30, благодаря чему максимальная длина кольцевого элемента составила 10,5 % от диаметра купола.

В случае постоянного количества ячеек (табл. 1) соотношение диаметров верхнего и нижнего колец куполов принято с разницей в 6 раз ( $d = D/6$ ), что позволило получить одинаковое расстояние между кольцами (2 м), а соответственно и количество уровней расположения колец (6). Длина меридионального элемента пространственных покрытий составила 2,5 м. Угол наклона ребер к горизонту при увеличении диаметра купола зафиксирован в пределах 53,55...38,45°.

Таблица 1

**Геометрические параметры куполов высотой 10 м с постоянным количеством ячеек**

| Номера куполов | Диаметр кольца, м |              | Длина кольцевого элемента, м |              | Угол наклона ребер, ° |
|----------------|-------------------|--------------|------------------------------|--------------|-----------------------|
|                | верхнего, $d$     | нижнего, $D$ | минимальная                  | максимальная |                       |
| 1              | 3,0               | 18           | 0,31                         | 1,88         | 53,55                 |
| 2              | 3,5               | 21           | 0,37                         | 2,20         | 49,16                 |
| 3              | 4,0               | 24           | 0,42                         | 2,51         | 45,17                 |
| 4              | 4,5               | 27           | 0,47                         | 2,83         | 41,53                 |
| 5              | 5,0               | 30           | 0,52                         | 3,14         | 38,45                 |

Следующий случай предполагал изменение количества ячеек (на 30), а соответственно и уровней расположения колец (на 1) в сторону их увеличения для каждого большего диаметра купола по отношению к предыдущему. Расстояние между кольцами уменьшилось и при диаметре купола  $D = 30$  м сократилось почти вдвое. Диаметр верхнего кольца куполов принят постоянным и составил 3 м. Изменяемой оказалась длина меридионального элемента пространственных конструкций. Пологость покрытий, за исключением базового купола ( $D = 18$  м), несколько увеличилась (на 2...5 %), о чем свидетельствует угол наклона ребер к горизонту (табл. 2).

Таблица 2

**Геометрические параметры куполов высотой 10 м с изменяемым  
количеством ячеек**

| Номера куполов | Диаметр, м | Количество                 |       | Максимальная длина кольцевого элемента, м | Длина меридионального элемента, м | Расстояние между кольцами, м | Угол наклона ребер, ° |
|----------------|------------|----------------------------|-------|-------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------|
|                |            | уровней расположения колец | ячеек |                                           |                                   |                              |                       |
| 1              | 18         | 6                          | 150   | 1,88                                      | 2,50                              | 2,00                         | 53,55                 |
| 2              | 21         | 7                          | 180   | 2,20                                      | 2,25                              | 1,67                         | 48,18                 |
| 3              | 24         | 8                          | 210   | 2,51                                      | 2,08                              | 1,43                         | 43,53                 |
| 4              | 27         | 9                          | 240   | 2,83                                      | 1,96                              | 1,25                         | 40,30                 |
| 5              | 30         | 10                         | 270   | 3,14                                      | 1,87                              | 1,11                         | 36,37                 |

Данный случай по сравнению с предыдущим позволил установить существенный рост (на 4 единицы) количества уровней расположения колец и, соответственно, числа ячеек (в 1,8 раза) при рассмотрении покрытия с максимальным диаметром ( $D = 30$  м).

Сформированная таким образом геометрия пространственных конструкций позволила определить узловые сосредоточенные нагрузки для покрытий с постоянным и изменяемым количеством ячеек (табл. 3).

Таблица 3

**Узловые нагрузки куполов высотой 10 м с постоянным и изменяемым  
количеством ячеек**

| Номера куполов | Диаметр, м | Узловые нагрузки при количестве ячеек, т |      |      |      |      |      |      |      |            |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------|------------|------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|------|------|------|
|                |            | постоянном                               |      |      |      |      |      |      |      | изменяемом |      |      |      |      |      |      |      |
| 1              | 18         | 0,48                                     | 0,79 | 0,63 | 0,47 | 0,32 | 0,08 | 0,48 | 0,79 | 0,63       | 0,47 | 0,32 | 0,08 |      |      |      |      |
| 2              | 21         | 0,55                                     | 0,92 | 0,74 | 0,55 | 0,37 | 0,10 | 0,50 | 0,85 | 0,71       | 0,57 | 0,43 | 0,29 | 0,08 |      |      |      |
| 3              | 24         | 0,63                                     | 1,05 | 0,84 | 0,63 | 0,42 | 0,11 | 0,53 | 0,92 | 0,79       | 0,66 | 0,53 | 0,40 | 0,27 | 0,07 |      |      |
| 4              | 27         | 0,71                                     | 1,18 | 0,95 | 0,71 | 0,47 | 0,12 | 0,56 | 0,99 | 0,87       | 0,74 | 0,62 | 0,50 | 0,37 | 0,25 | 0,07 |      |
| 5              | 30         | 0,79                                     | 1,31 | 1,05 | 0,79 | 0,53 | 0,14 | 0,59 | 1,06 | 0,94       | 0,83 | 0,71 | 0,59 | 0,48 | 0,36 | 0,24 | 0,06 |

Опорные узлы куполов закреплялись полностью. Связи в них назначались по направлению X, Y, Z.

Элементом для полноты расчетных моделей присваивался один и тот же замкнутый профиль (труба бесшовная горячекатаная) с одинаковыми параметрами поперечного сечения (диаметром 32 мм и толщиной стенки 2,8 мм).

По результатам расчета определялись параметры, характеризующие поведение и закономерности работы конструкций от действия собственного веса и от совместного влияния собственного веса и приложенной эксплуатационной нагрузки.

Имея полученные данные, анализировались цветные мозаики перемещений узлов и усилий в элементах, позволяющие установить степень загрузки

женности каждого элемента пространственных покрытий.

Расчет куполов с постоянным и изменяемым количеством ячеек позволил построить графики максимальных перемещений узлов конструкций от действия собственного веса (рис. 4) и от совместного влияния собственного веса и приложенной эксплуатационной нагрузки (рис. 5).

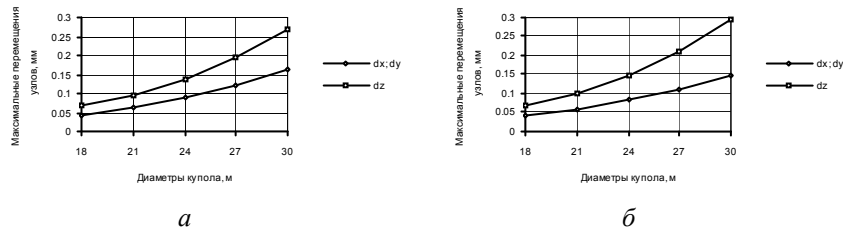


Рис. 4. Зависимость максимальных перемещений узлов от диаметра купола при действии собственного веса для конструкций с количеством ячеек:  
а – постоянным; б – изменяемым

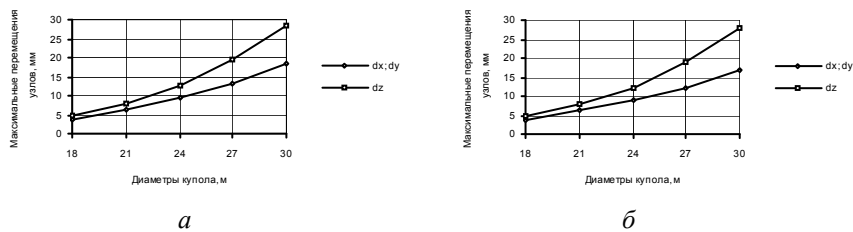


Рис. 5. Зависимость максимальных перемещений узлов от диаметра купола при совместном влиянии собственного веса и приложенной эксплуатационной нагрузки для конструкций с количеством ячеек:  
а – постоянным; б – изменяемым

Анализируя полученные значения, можно отметить, что в горизонтальном направлении изменение формы покрытий имеет незначительный характер. Наибольшие перемещения узлов конструкций зафиксированы по вертикали. Причем, и в том, и в другом направлении построенные графики показали достаточно ровную тенденцию к увеличению максимальных перемещений узлов для конструкций с постоянным и изменяемым количеством ячеек как от действия собственного веса, так и от совместного влияния собственного веса и приложенной эксплуатационной нагрузки.

Представленные результаты не единичны. Похожая графическая закономерность зафиксирована и для максимальных продольных усилий в элементах (рис. 6).

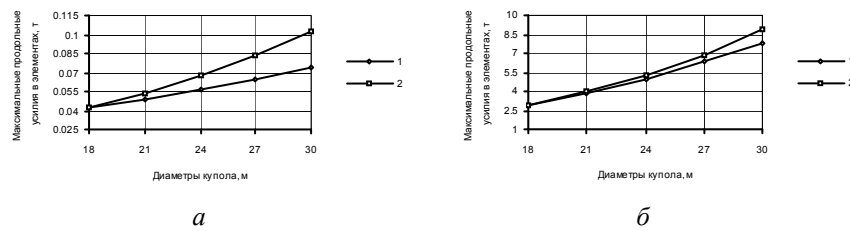


Рис. 6. Зависимость максимальных продольных усилий в элементах от диаметра купола: *а* – при действии собственного веса; *б* – при совместном влиянии собственного веса и приложенной эксплуатационной нагрузки для конструкций с количеством ячеек: 1 – постоянным; 2 – изменяемым

Несколько иначе дело обстоит со схемами визуализации в виде цветных мозаик  $N$ , полученных после расчета куполов.

В частности, для трех диаметров купола ( $D = 18$  м, 21 м, 24 м) в случае постоянного и изменяемого количества ячеек от действия собственного веса и от совместного влияния собственного веса и приложенной эксплуатационной нагрузки наиболее загруженными и сжатыми оказались элементы ребер у опорного контура и предпоследнее кольцо опорной зоны.

Однако, начиная с 4-го диаметра купола ( $D = 27$  м) характер работы конструкций несколько изменился. Максимальное сжатие получили элементы предпоследнего кольца опорной зоны в конструкциях с постоянным количеством ячеек и элементы ребер у опорного контура для конструкций с изменяемым количеством ячеек.

Полученный результат свидетельствовал об ослаблении работы системы отдельных элементов опорной зоны.

С увеличением диаметра купола случай с изменяемым количеством ячеек по сравнению с постоянным выявил уменьшение максимальных вертикальных перемещений узлов и увеличение наибольших продольных усилий в элементах.

Отмеченное обстоятельство характерно для куполов, рассчитанных с учетом совместного влияния собственного веса и приложенной эксплуатационной нагрузки.

Подобная закономерность частично соблюдалась и после расчета куполов с учетом собственного веса, где для конструкций с изменяемым количеством ячеек по сравнению с постоянным зафиксирован рост отмеченных показателей.

Однако представленная информация не позволяла оценить степень загруженности каждого элемента пространственного покрытия.

Поэтому, наиболее целесообразным оказалось продолжить расчет по программе ЛИР-СТК ПК ЛИРА и получить купола с рассчитанными размерами профилей.

С помощью полученных компьютерных моделей и табличных результатов расчета оценивался вклад в работу покрытий отдельных элементов.

Так, в результате анализа результатов расчета куполов от действия собственного веса и от совместного влияния собственного веса и приложенной эксплуатационной нагрузки, выяснилось, что основную работу выполняли элементы, расположенные в опорной зоне. Исключение составляли конструкции двух наибольших диаметров ( $D = 27$  м,  $30$  м) и преимущественно с изменяемым количеством ячеек.

Зафиксированное нарушение отмеченной закономерности потребовало увеличения размеров профилей элементов в средней зоне.

Другие тенденции определялись из оценки максимально загруженных элементов исследуемых конструкций. Построенные графики (рис. 7) свидетельствовали о том, что линии, отвечающие куполам с постоянным количеством ячеек, имели прогнозируемый характер. Лишь в одной конструкции ( $D = 24$  м), относящейся к ряду покрытий с изменяемым количеством ячеек с учетом собственного веса, уменьшился максимальный диаметр элементов. Кроме того, в случае с постоянным количеством ячеек при действии собственного веса и в случае с изменяемым количеством ячеек от совместного влияния собственного веса и приложенной эксплуатационной нагрузки при переходе от одного купола ( $D = 21$  м) к другому ( $D = 24$  м) максимальный диаметр элементов остался неизменным.

Очевидно, что отмеченный факт вызван наиболее приемлемым диаметром купола ( $D = 24$  м) для данной высоты ( $H = 10$  м).

Однако рассмотренный подход показал лишь общие закономерности без отдельного рассмотрения двух семейств элементов, расположенных во взаимно перпендикулярных направлениях.

Учитывая данное обстоятельство, возникла необходимость в построении графиков, позволивших последовательно определить максимально загруженные кольцевые и меридиональные элементы рассматриваемых конструкций.

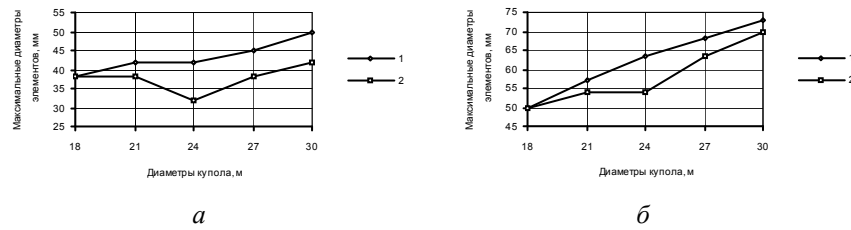


Рис. 7. Зависимость максимальных диаметров элементов от диаметра купола: *а* – при действии собственного веса; *б* – при совместном влиянии собственного веса и приложенной эксплуатационной нагрузки для конструкций с количеством ячеек: 1 – постоянным; 2 – изменяемым

Исходя из анализа линий, показанных на рис. 8, установлены одинаковые, за исключением одного купола ( $D = 30$  м), максимальные диаметры кольцевых элементов для конструкций с постоянным и изменяемым количеством ячеек от действия собственного веса и от совместного влияния собственного веса и приложенной эксплуатационной нагрузки.

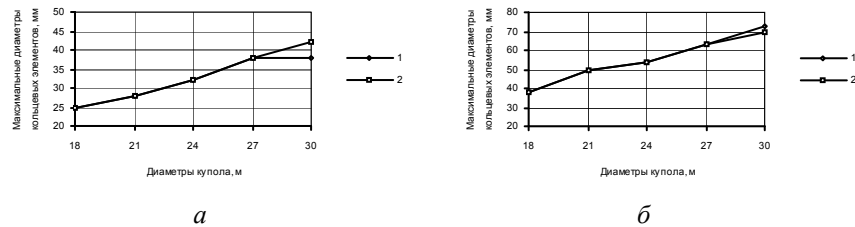


Рис. 8. Зависимость максимальных диаметров кольцевых элементов от диаметра купола: *а* – при действии собственного веса; *б* – при совместном влиянии собственного веса и приложенной эксплуатационной нагрузки для конструкций с количеством ячеек: 1 – постоянным; 2 – изменяемым

Другие линии, представленные на рис. 9, ориентированы на противоположную тенденцию расположения максимальных диаметров меридиональных элементов для куполов с постоянным и изменяемым количеством ячеек при учете собственного веса. В случае постоянного количества ячеек заметно увеличение, а в случае изменяемого – уменьшение максимальных диаметров реберных элементов. Для конструкций с постоянным и изменяемым количеством ячеек от действия собственного веса и от совместного влияния собственного веса и приложенной эксплуатационной нагрузки отмечен рост максимальных диаметров меридиональных элементов. Причем, анализ перехода от одного купола ( $D = 21$  м) к другому ( $D = 24$  м) показал, что максимальный диаметр элементов, который остался

неизменным, расположился в меридиональном направлении. К тому же, для 3-го купола ( $D = 24$  м) от действия собственного веса зафиксировано резкое уменьшение, а от совместного влияния собственного веса и приложенной эксплуатационной нагрузки – наибольшее отличие максимального диаметра меридиональных элементов. Дальнейший рост указанного показателя для куполов от действия собственного веса и в случае постоянного количества ячеек свидетельствовал об увеличении загруженности максимально включенных в работу меридиональных элементов. Добавление уровней расположения колец для куполов, напротив, привело к снижению нагрузок на наиболее сжатые меридиональные элементы.

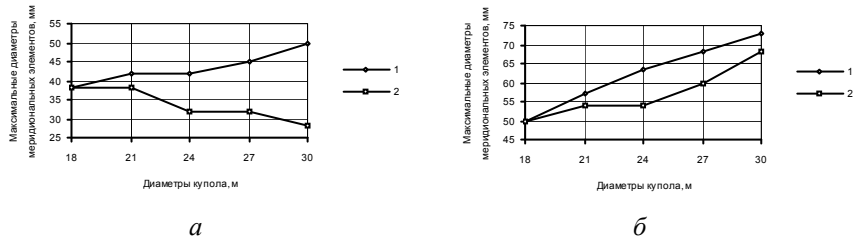


Рис. 9. Зависимость максимальных диаметров меридиональных элементов от диаметра купола: *а* – при действии собственного веса; *б* – при совместном влиянии собственного веса и приложенной эксплуатационной нагрузки для конструкций с количеством ячеек: 1 – постоянным; 2 – изменяемым

## Выводы

Из результатов проведенных численных исследований куполов разного диаметра, но с неизменным количеством секторов и фиксированной стрелой подъема получен ряд закономерностей, имеющих важный прикладной и практический характер.

Выполненные расчеты позволили определить параметры, характеризующие поведение и тенденции работы конструкций для постоянного и изменяемого количества ячеек при увеличении диаметра покрытий от действия собственного веса и от совместного влияния собственного веса и приложенной эксплуатационной нагрузки.

Наиболее показательными оказались данные о продольных усилиях в элементах, позволившие выявить зоны загруженности покрытий. Для сравнительно небольших диаметров куполов ( $D = 18 \dots 24$  м) максимальное сжатие получили элементы ребер у опорного контура и предпоследнее кольцо опорной зоны. Расчет куполов большего диаметра ( $D = 27$  м,  $30$  м) привел к некоторому изменению характера работы конструкций. Максимально сжались элементы предпоследнего кольца опорной зоны в конст-

рукциях с постоянным количеством ячеек и элементы ребер у опорного контура для конструкций с изменяемым количеством ячеек.

Добавление уровней расположения колец привело к существенному уменьшению максимальных вертикальных перемещений узлов и увеличению наибольших продольных усилий в элементах. Наглядное представление этих и других закономерностей получено с помощью схем визуализации и построенных графиков.

Анализ характерных тенденций, показал общий факт отсутствия роста максимального диаметра элементов на одном из этапов увеличения диаметров куполов. Причем каждый из двух семейств элементов, расположенных во взаимно перпендикулярных направлениях, характеризовался своими отличительными особенностями. В частности, максимальные диаметры кольцевых элементов повторялись для большинства куполов, за исключением последнего ( $D = 30$  м). В меридиональном же направлении отмечено значительное расхождение максимальных диаметров реберных элементов. Тем не менее, случай с изменяемым количеством ячеек показал достаточно приемлемый результат.

### **Литература**

- [1] Беленя Е.И., Гениев А.Н., Балдин В.А. Купольные покрытия. – В кн.: Металлические конструкции. Учеб. для вузов / Под общ. ред. Е.И. Беленя. – М.: Стройиздат, 1976. – С. 463 – 469.
- [2] Савельев В.А. Теоретические основы проектирования металлических куполов: Дис... докт. техн. наук. – Москва, 1995. – 439 с.
- [3] Голосов В.Н., Ермолов В.В., Лебедева Н.В. и др. Купола ребристые, сетчатые и панельные. – В кн.: Инженерные конструкции. Учеб. для вузов по спец. “Архитектура” / Под ред. В.В. Ермолова. – М.: Высш. шк., 1991. – С. 233 – 235.
- [4] Савельев В.А. Металлические купола. – В кн.: Современные пространственные конструкции (железобетон, металл, дерево, пластмассы): Справочник / Под ред. Ю.А. Дыховичного, Э.В. Жуковского. – М.: Высш. шк., 1991. – С. 187–204.
- [5] Гохарь-Хармандарян И.Г. Большепролетные купольные здания. – М.: Стройиздат, 1972. – 150 с.

*Надійшла до редколегії 17.06.2009 р.*