

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-2\(25\)-89-95](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-2(25)-89-95)  
УДК 693.2

# ПРОЧНОСТЬ И НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ КИРПИЧНЫХ СВОДОВ МОНЬЕ

## STRENGTH AND BEARING ABILITY OF MONIER'S BRICK VAULTS

Г. А. МИНАСЯН

*Рассмотрены два подхода к моделированию кирпичной кладки и проведено сравнение результатов расчета с натурными испытаниями, необходимыми для уточнения расчетной схемы и для точной оценки остаточного ресурса кирпичных сводов.*

*Рассмотрены натурные испытания раствора кладки и кирпича сводчатых перекрытий для определения фактических значений прочности.*

*Приводятся результаты расчета двух кирпичных сводов по гетерогенной и гомогенной модели:*

*- 1-я модель – гетерогенная, кирпич и раствор сводов представлены отдельными элементами;*

*- 2-я модель – гомогенная, кладки моделируются, как сплошная, однородная.*

*This article discusses two approaches to modelling brickwork and comparing calculation results with full-scale testing, in order to select an updated calculation scheme for an accurate estimate of the remaining life of brick arches.*

*Field tests of masonry mortar and vaulted brick are given to determine their strength.*

*The results of calculating two brick vaults according to a heterogeneous and homogeneous model are presented:*

*- 1<sup>st</sup> model — heterogeneous, brick and mortar of arches are represented by separate elements*

*- The 2<sup>nd</sup> model is homogeneous, masonry is modelled as solid, homogeneous.*

### Ключевые слова:

*Кирпичная кладка, моделирование, несущая способность, прочность, своды*

### Key words:

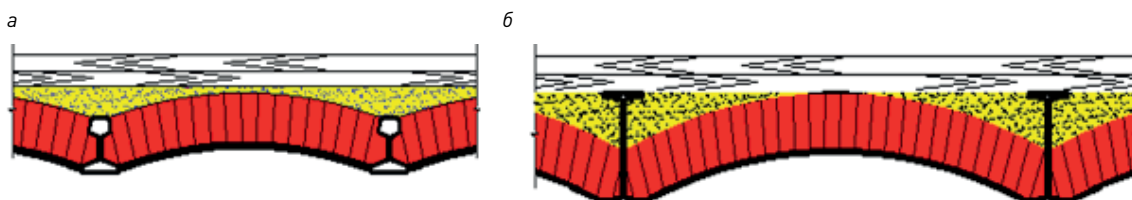
*Arches, bearing capacity, brickwork, modelling, strength.*

### Введение

На территории России широкое распространение сводчатые кирпичные перекрытия получили со второй половины X в., и связано это, в первую очередь, со строительством культовых сооружений. Такие сводчатые перекрытия были распространены вплоть до XIX в. На смену им пришли новые, более технологичные по своей конструкции перекрытия, называемые сводами «Монье» (рис. 1). Перекрытия со сводами по стальным балкам (рис. 2), при устройстве сводчатой части в которых использована кирпичная кладка на известковом и сложном растворе, а в XX в. — на цементно-песчаном растворе.



**Рис.1.** Общий вид арочного перекрытия (своды «Монье»)



**Рис.2.** Схема перекрытия со сводами по стальным балкам: *а* — по рельсовым балкам; *б* — по двутавровым балкам

Эти конструкции представляют собой цилиндрические своды из кирпичной кладки, опирающиеся своими продольными сторонами на металлические балки. Такое конструктивное решение наиболее характерно для подвальных перекрытий жилых зданий, а также часто встречается в культовых сооружениях. В производственных зданиях по такой схеме выполнялись также и междуэтажные перекрытия (например «Многофункциональный комплекс ГЭС - 2» в г. Москве).

При обследовании зданий со сводчатыми перекрытиями из кирпичной кладки часто наблюдаемыми дефектами являются трещины, деградация и расслоение кладки, причиной которых могут быть: эксплуатационный износ, перегрузки, динамические воздействия, техногенные и другие факторы. Особенно неблагоприятным условием является деградация растворных швов.

В результате нарушения сцепления между растворными швами и камнями снижается прочность кладки на растяжение и сдвиг, а также ее деформационные характеристики. Восстановление работоспособности поврежденных участков обычно осуществляется путем усиления, а также путем сборки отдельных участков из извлеченных фрагментов кладки.

При этом не учитывается резерв их несущей способности, обусловленный совместной работой арок с расположенными над ними участками каменной кладки. В работе [7] экспериментально установлено, что расположенные над арками слои каменной кладки участвуют в перераспределении нагрузки от их собственной массы и веса перекрытий, разгружая тем самым арки. Эффект их совместной работы возрастает с увеличением кривизны и стрелы подъема арок, а также толщины расположенных над ними слоев кладки.

## 1. Цели, задачи, исходные параметры

Предусмотрено моделирование процессов работ кладки с учетом пространственного эффекта теории прочности. Для этой цели разработаны две модели гетерогенной и гомогенной структуры.

1-я модель – гетерогенная: кирпич и раствор сводов представлены отдельными элементами, а связи между ними — дополнительными элементами. Для кирпича и раствора прочностные и деформативные характеристики применяются в соответствии с их фактическим значением, по результатам лабораторных испытаний образцов. При этом элементы поверхности моделируются как плоскости сдвига и трещинообразования. Эта модель для больших объектов трудоемкая и связана со значительными сложностями.

2-я модель – гомогенная: кладка моделируется, как сплошная, однородная среда. При этой модели задается приведенная характеристика кладки. Для сопоставительного анализа прочности и деформативности сводчатых конструкций выполняются:

- испытание кирпича и раствора, отобранных из конструкций сводов для определения их фактических значений прочности;
- конечно-элементное моделирование конструкций кирпичных сводов и их расчет по гомогенным и гетерогенным методам моделирования кладки;
- натурные испытания конструкций кирпичных сводов;
- сопоставительный анализ по результатам натурных испытаний и по двум вариантам численных расчетов.

## 2. Анализ результатов проведенных испытаний

Для определения фактических значений прочности кирпича и раствора были проведены испытания компонентов сводов, отобранных непосредственно из конструкций. Полученные результаты использованы при расчете в гетерогенных и гомогенных моделях сводов.

На рис. 3 показано проведение испытаний образцов раствора и кирпича. По полученным результатам испытаний раствора на сжатие, кирпича — на сжатие и изгиб были определены их прочности.



Рис.3. Проведение испытаний образцов раствора (а, б) и кирпича (в)

В табл. 1 приведены результаты испытания образцов кубиков из строительного раствора на центральное сжатие по ГОСТ 5802-86 Растворы строительные. Методы испытания (Объект «Многофункциональный комплекс ГЭС-2», г. Москва).

Таблица 1

**Результаты испытания образцов кубиков**

| № п/п | Размеры, см     | F, см <sup>2</sup> | P, кгс | R <sub>сж</sub> , кгс/см <sup>2</sup> без погр. коэф. | Попр. коэф. | R <sub>сж</sub> , кгс/см <sup>2</sup> с погр. коэф. |       | Отклонение от ср., % |
|-------|-----------------|--------------------|--------|---|-------------|---|-------|----------------------|
|       |                 |                    |        |   |             | Част  | ср    |                      |
| 1     | 3,8 × 3,7 × 3,6 | 14,06              | 215,0  | 15,29   | 0,77        | 11,77   | 11,45 | +2,79                |
| 2     | 3,9 × 3,9 × 3,7 | 15,21              | 220,0  | 14,46   | 0,78        | 11,28   |       | -1,48                |
| 3     | 3,5 × 3,5 × 3,1 | 12,25              | 175,0  | 14,28   | 0,75        | 10,71   |       | -6,46                |
| 4     | 3,5 × 3,3 × 3,4 | 11,55              | 190,0  | 16,45   | 0,74        | 12,17   |       | +6,28                |
| 5     | 3,5 × 3,5 × 3,1 | 12,25              | 185,0  | 15,10   | 0,75        | 11,32   |       | -1,13                |

Прочность раствора кладки по результатам испытаний на сжатие соответствует: R<sub>сж</sub> = 11,45 кгс/см<sup>2</sup> (М10).

В табл. 2 приведены результаты испытания кирпича, отобранного на объекте по ГОСТ 8462-85 (Объект «Многофункциональный комплекс ГЭС-2», г. Москва).

По результатам испытаний на сжатие и изгиб прочность кирпича соответствует марке М75.

Таблица 2

**Результаты испытания кирпича**

| № | Сжатие      |                    |        |                                       |       | Изгиб           |                        |                  |                   |        |  |      |                 |
|---|-------------|--------------------|--------|---------------------------------------|-------|-----------------|------------------------|------------------|-------------------|--------|--|------|-----------------|
|   | Размер, см  | F, см <sup>2</sup> | P, кгс | R <sub>сж</sub> , кгс/см <sup>2</sup> |       | Отклонение от % | Расст. между опорами l | Ширина образца b | Толщина образца h | P, кгс | R <sub>изг</sub> , кгс/см <sup>2</sup> |      | Отклонение от % |
|   |             |                    |        | част.                                 | ср.   |                 |                        |                  |                   |        | част.                                  | ср.  |                 |
| 1 | 12,0 × 12   | 144,0              | 11960  | 83,0                                  | 83,16 | -0,19           | 20                     | 12               | 7,5               | 590    | 26,2                                   | 28,2 | -7,20           |
| 2 | 12,5 × 12   | 150,0              | 12120  | 80,8                                  |       | -2,83           | 20                     | 12               | 6,5               | 480    | 28,4                                   |      | +0,50           |
| 3 | 12,5 × 12   | 150,0              | 12880  | 85,8                                  |       | +3,17           | 20                     | 12               | 6,5               | 540    | 31,9                                   |      | +12,9           |
| 4 | 11,0 × 12,5 | 137,5              | 11400  | 82,9                                  |       | -0,31           | 20                     | 12,5             | 7,0               | 550    | 26,9                                   |      | -4,70           |
| 5 | 12,4 × 12   | 148,8              | 12400  | 83,3                                  |       | +0,16           | 20                     | 12               | 6,5               | 470    | 27,8                                   |      | -1,55           |

**3. Результаты расчетов**

Далее приводятся результаты расчета двух кирпичных сводов по гетерогенной и гомогенной моделям.

С помощью лицензированного программного комплекса «SCAD office» были смоделированы кирпичные своды с постоянными толщинами, соответственно 250 мм и 120 мм, пролетом 3000 мм и шириной 1250 мм. Характеристики сводов и их конечно-элементных схем приведены в табл. 3.

В опорных узлах принято жесткое защемление. Конечно-элементные расчетные схемы принимаются объемными элементами.

Размер кирпича 250 × 120 × 65 мм. Расчетные нагрузки принимаются как собственный вес и полезные нагрузки общественного здания.

Для кирпича модуль деформации E = 11000 МПа; коэффициент Пуассона ν=0,12; для

раствора  $E = 4000$  МПа,  $\nu=0,22$ . Для гомогенной расчетной схемы определены приведенные характеристики  $E = 3550$  МПа,  $\nu=0,18$ .

Таблица 3

#### Характеристики сводов и их конечно-элементные схемы

| №<br>n/n | Используемая модель | Стрела подъема, м | Объемный вес элементов, кг/м <sup>3</sup> |         | Число элементов |         |
|----------|---------------------|-------------------|---|---------|-----------------|---------|
|          |                     |                   | Кирпич                                    | Раствор | Кирпич          | Раствор |
| 1        | Гомогенная          | 0,25              | 1700                                      |         | 2750            |         |
| 2        |                     | 0,20              | 1700                                      |         | 2260            |         |
| 3        | Гетерогенная        | 0,25              | 1650                                      | 1900    | 550             | 8500    |
| 4        |                     | 0,20              | 1650                                      | 1900    | 400             | 7860    |

#### 4. Анализ результатов расчета

По результатам проведенного расчета (табл. 4) напряженные состояния гетерогенных и гомогенных моделей дают близкие значения (рис. 4). Максимальные значения растягивающего и сжимающего напряжений в гетерогенной модели соответственно выше на 8% и 12%, чем в гомогенной модели. У гетерогенной модели напряженное состояние в растворном шве на 30...35% меньше, чем в кирпичной кладке.

На кирпич во всех случаях передаются более высокие напряжения. Кроме того, они распределены неравномерно. Напряжения концентрируются по угловым зонам, а также по полосам, параллельным вертикальным растворным швам. Необходимо отметить, что в сжатой зоне свода сначала происходит разрушение кирпича, а затем — раствора при потере состояния трехосного сжатия, а в растянутой зоне сначала происходит разрушение раствора. Напряжения в горизонтальных швах кладки почти в два раза больше, чем вертикальных. С целью более точного описания поведения кирпичных сводов разработаны и обоснованы критерии прочности в трехмерном напряженном состоянии, что приводит к универсальной теории прочности модели кладки кирпичных сводов.

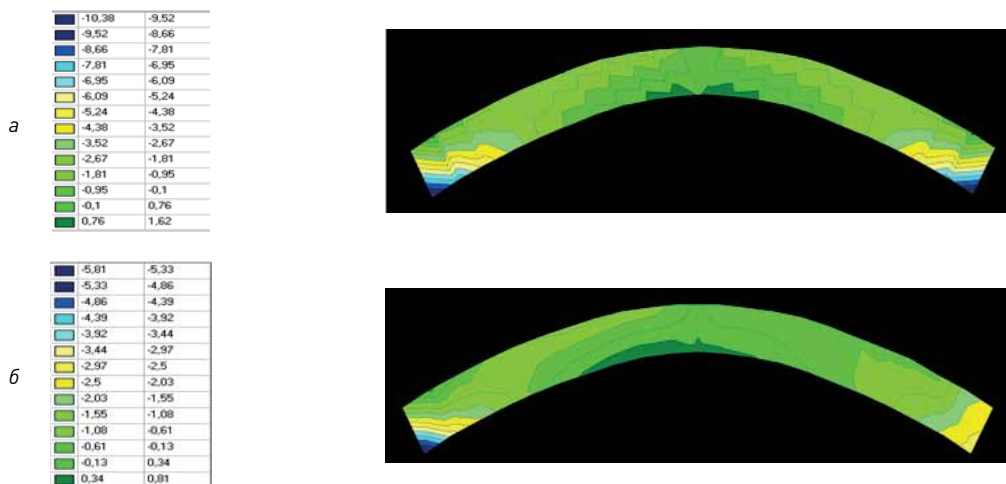


Рис.4. Модели свода гетерогенной и гомогенной структур.

Максимальные главные напряжения, действующие в сечении: а – гетерогенная модель; б – гомогенная модель

**Результаты проведенного расчета**

| № п/п | Используемая модель | Стрела подъема, м | Максимальные главные растягивающие напряжения, МПа | Максимальные главные сжимающие напряжения, МПа |
|-------|---------------------|-------------------|--|--|
| 1     | Гомогенная          | 0,5               | 0,008  | -0,05  |
| 2     | Гетерогенная        | 0,5               | 0,016  | -0,103   |

На рис. 5 изображен график «нагрузка-прогиб», полученный экспериментальным путем, а также в результате расчетов. По графикам видно, что значение расчётов по гетерогенной модели близко к значениям при эксперименте. Это объясняется включением в работу соседних блоков и сводчатого заполнения, как при действии сосредоточенной нагрузки, так и при равномерно-распределенной. Можно, рассматривать их совместную работу в виде отдельных участков конструкций сводов как в гетерогенной, так и гомогенной модели. Для корректного расчета необходимо учитывать совместную работу отдельных участков модели в зависимости схемы расчета.

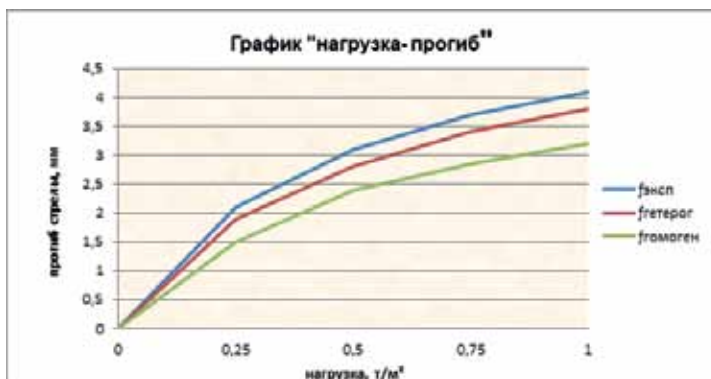


Рис.5. График «нагрузка-прогиб»

**Выводы**

По результатам расчета напряженные состояния кирпичных сводов гетерогенных и гомогенных моделей дают близкие результаты.

Максимальные значения растягивающих и сжимающих напряжений в гетерогенной модели выше в среднем на 10-12%, чем в упрощенной модели. У гетерогенной модели напряженное состояние в растворном шве на 30...35% меньше, чем в кирпичной кладке.

Тахеометрическая съемка прогибов и деформаций при натуральных испытаниях показывает близкие результаты эксперимента для гетерогенной системы, разница в среднем составляет до 4%, а гомогенной — до 9%, и та ким образом подтверждается практическая точность гетерогенной модели.

Рассмотренное конструктивное решение сводов широко распространено в зданиях старой застройки, часть из которых является объектами культурного наследия. Применение более подходящего метода расчета и определение фактической несущей способности приводит к сокращению излишних затрат по усилению или замене перекрытий (часто невозможно выполнить из архитектурных соображений). Поэтому необходимо усовершенствование существующих методик расчета, учитывающих совместную работу сводчатого заполнения со стальными балками.

## Библиографический список

1. *Кашеварова Г.Г., Труфанов Н.А.* Моделирование механического поведения кирпичной кладки для оценки деформационных ресурсов строительных конструкций // Современная миссия технических университетов в развитии инновационных территорий. 2004. № 1. С. 97-102.
2. *Зимин С.С., Кокотова О.Д., Беспалов В.В.* Сводчатые конструкции исторических зданий // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 2(29). С. 57-72.
3. *Онищук Л.И.* Прочность и устойчивость каменных конструкций. М.: ОНТИ, 1937. 276с.
4. *Улыбин А. В., Зубков С. В.* О методах контроля прочности керамического кирпича при обследовании зданий и сооружений // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 3. С. 29-34.
5. *Пангаев В. В.* Развитие расчетно-экспериментальных методов исследования прочности кладки каменных конструкций. Дис. ... д.т.н. Новосибирск, 2009. 257 с.
6. *Беспалов В.В., Зимин С.С.* Прочность каменной кладки сводчатых конструкций. // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. № 11(50). С.37-51.
7. *Tianyi Yi.* PhD Thesis. Experimental Investigation and Numerical Simulation of an Unreinforced Masonry Structure with Flexible Diaphragms. Georgia Institute of Technology. 2004. 671 p.

## Автор

Гегине Арамаисовна МИНАСЯН, инженер, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

Gegine MINASYAN, engineer, TSNIISK named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: Gm-90@list.ru

тел.: +7 (499) 174-77-94