

УДК 624.042

Попов А.О. – кандидат технических наук

E-mail: a.o.popov@yandex.ru

Матвеев И.Ю. – кандидат экономических наук, доцент

E-mail: matigur@mail.ru

Курамшин К.В. – студент

E-mail: kuramschin@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Прочность по нормальным сечениям и деформативность кирпичных цилиндрических сводов, усиленных углеродными холстами

Аннотация

С начала XVII в. и вплоть до времени индустриализации в России было построено множество каменных зданий, перекрытия которых устроены в виде каменных сводов той или иной конфигурации. Сводчатые перекрытия являются украшением любого исторического здания, а также создают особую атмосферу в помещениях. Наиболее распространенной конструкцией сводов являются цилиндрические (полуциркульные) и более пологие – коробовые своды.

В настоящей работе авторами на основе инженерно-технических исследований [1, 2] приводится классификация схем разрушения цилиндрических сводов, а так же предлагается методологический подход к восстановлению работоспособного состояния.

Ключевые слова: памятники истории и культуры, инженерная реставрация, реконструкция, усиление.

Сохранению архитектурного наследия во всем содействует политика государства и подчиненных ему министерств и ведомств, которое заключается в том, что все собственники зданий, имеющих историческую и культурную ценность, получают охранные обязательства, в которых прописаны предметы охраны и степень их ценности. Как правило, при наличии сводчатых перекрытий в список «охраны» здания они попадают в первую очередь. Работы по реконструкции и реставрации зданий, имеющих историческую ценность, начинаются с проведения инженерно-технического и историко-культурного исследования, на основании которого уже формируется четкое задание на разработку конструктивных решений по усилению и восстановлению. В связи с чем работы по инженерно-техническому обследованию являются основополагающими, а следовательно должны проводиться скрупулезно и детально, дабы не оставлять ни каких недосказанностей и пробелов. Зачастую обследование здания начинается задолго до начала строительных работ, а иногда и вовсе в еще эксплуатируемых зданиях, что в значительной степени затрудняет работы по обследованию, и сводит к минимальным, а не к требуемым для описания здания количествам шурфов и вскрытий. Последнее в значительной степени снижает качество обследования, а, следовательно, уменьшение исходных данных для проектирования. Если замачивание, разрушение кладки того или иного вида, трещины раскрытия в нижней части свода легко диагностируемы и видны невооруженным взглядом, то трещины смятия в этой же зоне могут не превышать 150 мкм, что не просто разглядеть и в специальную лупу. Последнее приводит к тому, что не учтены возможные магистральные трещины, с внешней стороны свода.

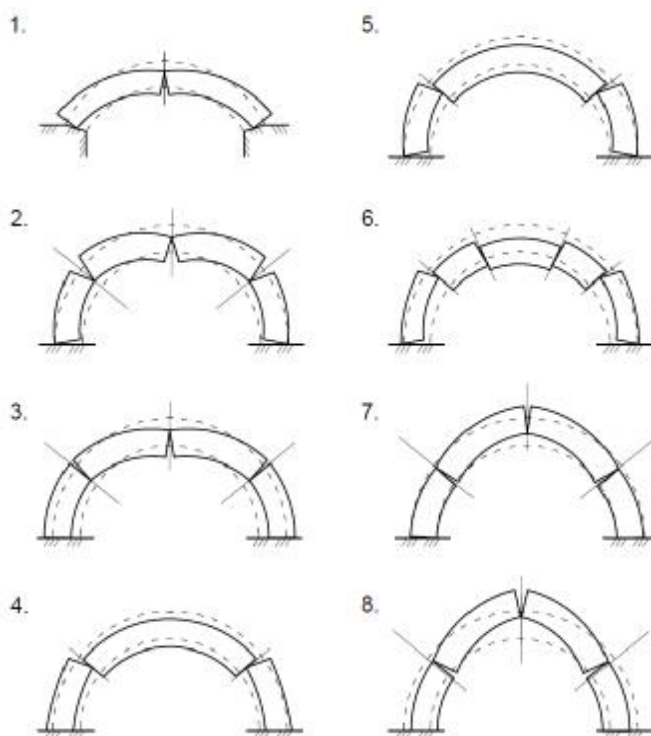


Рис. 1. Схемы разрушения каменных сводов

Цилиндрические и коробовые своды являются распорными конструкциями, что в целом и определяет схемы их разрушения. Многочисленные работы по обследованию, усилению и реставрации исторических зданий, проведенные авторами [1, 2], а также данные приведенные в фундаментальных трудах под редакцией Н.К. Лахтина [3] и В.Р. Бернгарда [4], позволили систематизировать повреждения цилиндрических и коробовых сводов (рис. 1), в которых можно выделить следующие факторы формирования:

1. Сдвиг пяты свода по щеке, возможно с поворотом относительно внутреннего угла пяты. Данная деформация приводит к просаживанию стрелки свода, раскрытию трещин по швам кладки в замковой части (по внутренней поверхности свода), с возможным вывалом камней, и смятию кладки в замковой части, по внешней поверхности свода (рис. 1.1);

2. Поворот относительно наружного угла пяты с просаживанием стрелки свода. Данная деформация приводит к раскрытию трещин по швам кладки в замковой части (по внутренней поверхности свода), с возможным вывалом камней, и смятию кладки в замковой части, по внешней поверхности свода, а также к раскрытию трещин в плечевой зоне свода, по внешней поверхности (рис. 1.2);

3. Сдвиг пяты свода по щеке, с одновременным просаживанием стрелки свода. Данная деформация приводит к раскрытию трещин по швам кладки в замковой части (по внутренней поверхности свода), с возможным вывалом камней, и смятию кладки в замковой части, по внешней поверхности свода, а также к раскрытию трещин в плечевой зоне свода, по внешней поверхности (рис. 1.3);

4. Сдвиг пяты свода по щеке, с одновременным просаживанием пролетной части свода. При этом, как один из сопутствующих вариантов, возможен сдвиг кладки по растворному шву, в плечевой зоне свода. А также смятие кладки в замковой части, по внутренней поверхности свода (рис. 1.4);

5. Поворот относительно наружного угла пяты, с одновременным просаживанием пролетной части свода. При этом, как один из сопутствующих вариантов, возможен сдвиг кладки по растворному шву, в плечевой зоне свода. А также смятие кладки в замковой части, по внутренней поверхности свода (рис. 1.5);

6. Поворот относительно наружного угла пяты, с одновременным просаживанием пролетной части свода. При этом, как один из сопутствующих видов повреждения, возможен сдвиг кладки по растворному шву, в плечевой и замковой зонах свода (рис. 1.6). Количество плоскостей сдвига зависит от физико-механических свойств кладочного раствора, размеров камней, толщины и заполнения растворных швов;

7. Поворот относительно внутреннего угла пяты, с одновременным приподниманием стрелки свода и изломом в плечевой зоне. Данная деформация приводит к раскрытию трещин по швам кладки в замковой части (по внешней поверхности свода), и смятию кладки в замковой части (по внутренней поверхности свода), а также к раскрытию трещин в плечевой зоне свода, по внутренней поверхности (рис. 1.7);

8. Сдвиг пяты свода по щеке, с одновременным приподниманием стрелки свода и изломом в плечевой зоне. Данная деформация приводит к раскрытию трещин по швам кладки в замковой части (по внешней поверхности свода), и смятию кладки в замковой части (по внутренней поверхности свода), а также к раскрытию трещин в плечевой зоне свода, по внутренней поверхности (рис. 1.8);

Разрушение по первому типу (рис. 1.1) характерно в первую очередь для коробовых сводов с малой стрелой подъема нагруженных или самонесущих. Встречается первый тип разрушения для полуциркулярных сводов, однако подобная схема возникает при совокупности факторов связанных с некачественным выполнением работ по усилению, а именно полностью убирается балластный пригруз, в опорной части, и перегружается пролетная часть. Второй и третий тип разрушения (рис. 1.2, 1.3) характерен для самонесущих цилиндрических сводов, а возникающие повреждения связаны со смещением поддерживающих их стен, при этом происходит поворот и смещение разделенных трещинами элементов свода. Для несущих сводов, перегруженных внешней нагрузкой (рис. 1.4, 1.5, 1.6), характерны четвертый, пятый и шестой типы разрушения, и имеют механизм разрушения, отличающийся от приведенных ранее, который заключается в том, что центральный элемент, перемещаясь по поверхности скольжения, сдвигает, поворачивает или поворачивает со сдвигом опорные элементы. Разрушение по типу семь и восемь (рис. 1.7, 1.8) характерно для перегруженных несущих сводов, как со смещением опорных стен, так и с вращением отдельных блоков вызванных силовыми и не силовыми воздействиями, к которым также относится замачивание, снижающее прочностные и деформационные характеристики кладки.

Исходя из выше приведенных факторов классифицировать повреждения каменных сводов, предлагается на трещины «сдвига» и «изгиба».

Цилиндрические и коробовые своды имеют огромный запас «жизнеспособности» и обрушения их очень редки [1, 2]. Связано это в первую очередь с тем, что неповрежденный свод, получая первые повреждения, независимо от их типа и происхождения (рис. 1), переходит из одного стационарного статически и геометрически неизменяемого положения в другое. При этом в зоне сдвига или трещины, уже разделенный на отдельные блоки или сектора свод расклинивается, тем самым получая новое стационарное положение – второе и т.д., до стадии разрушения. Количество стационарных положений прямым образом зависит от геометрии свода и толщины поперечного сечения. Несущая способность цилиндрических сводов зависит как от геометрии свода, дефектов и повреждений, так и от механических характеристик кладки. Сводчатые перекрытия исторических зданий, как правило, устроены из глиняного кирпича (реже из природного камня) на известковом растворе, в связи, с чем на прочностные и деформационные характеристики кладки из этих материалов в значительной степени влияет влажность.

Требования к усилению каменных сводов исторических зданий можно разделить на две большие подгруппы, где главенствующую роль играют требования по материалам, а вторая, но не менее важная роль отдана конструктивным решениям. Исходя из законов бионики эти требования можно записать как «усиляй подобным», а именно механические (прочностные и деформационные) характеристики элементов усиления и объекта должны быть близки, кроме того особое внимание необходимо уделять физическим характеристикам (плотность, влажность, паропроницаемость и т.д), до и после усиления, а также прогнозировать изменения этих характеристик.

Вопросам несущей способности, деформативности и усиления каменных конструкций посвящены работы Л.И. Онищика, Л.Д. Проскурякова, И.П. Прокофьева, Г.П. Передерия, Н.Н. Аистова, В.А. Гастерова, Н.П. Попова, В.П. Некрасова, А.А. Гвоздева, И.А. Рохлина, П.Л. Пастернака, С.А. Семенцова, А.А. Шишкина, И.Т. Котова, В.А. Кайменко, Н.И. Кравчени, Г.Н. Бруснецова, В.Э. Будрейко и многих других. Несмотря на то, что в данном направлении работала плеяда выдающихся Российских ученых, вопросы усиления каменных сводов, исторических зданий, остались недостаточно освещены. Предложенные методы усиления стальными обоймами, дублирующими арками и сводами, железобетонными и растворными рубашками, а также стальными тяжами, не всегда отвечают требованиям, предъявляемым к историческим зданиям, собственниками и курирующими специалистами Министерства культуры или подотчетными Министерству культуры комитетами.

Основываясь на вышеприведенных условиях, авторами предлагается методика усиления каменных сводов высокопрочными углеродными материалами, устроенными по дискретной схеме, с регулярным шагом установки, который назначается исходя из условий паропроницаемости кладки и зависит от толщины свода, но не менее чем через $2t$, где t – толщина свода.

Невзирая на схему разрушения, геометрическая форма цилиндрического свода остается близкой к исходной, а деформации замковой части могут быть определены геодезическими измерениями. Из геодезических измерений проведенных авторами [1, 2], перемещение замкового камня для цилиндрических сводов не превышает $1/300l$, а для коробовых $1/350l$.

В связи с этим для расчета устойчивости свода предлагается единая расчетная схема вне зависимости от типа повреждения.

Для разработки методики расчета рассмотрим средний свод, который находится в цепи сводов устроенных с регулярным шагом, нагруженный равномерно распределенной нагрузкой q . Тогда рассматривая, цилиндрический свод как шарнирно закрепленную арку конечной ширины получим следующую схему (рис. 2).

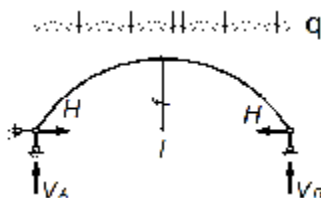


Рис. 2. Расчетная схема арки

Воспользовавшись решениями, приведенными в пособии к СНиП II-22-81 для расчета каменных сводов, авторами предлагается методика расчета свода с учетом усиления его высокопрочными углеродными материалами.

Условия равновесия арки записываются следующим образом:

$$V_A = V_B = 0,5ql, \quad (1)$$

$$H = 0,125 \frac{ql^2}{f} k, \quad (2)$$

где V_A и V_B – вертикальные реакции в опорах свода;

H – горизонтальный распор;

q – распределенная нагрузка;

l – пролетная часть свода;

k – коэффициент учитывающий обжатие свода и смещение опор.

Влияние смещения опор и обжатие свода предлагается записать в известном виде [8] с учетом приведенного модуля деформации:

$$k = \frac{1}{1 + 1,876 \frac{l}{f^2} \left(\frac{2\Delta E_{\text{прив}}^k}{l} + \frac{n}{A} \right)}, \quad (3)$$

где A и I – площадь, см^2 , и момент инерции, см^4 , поперечного сечения свода;
 $E_{\text{прив}}^k$ – приведенный модуль деформации свода, с учетом усиления высокопрочными углеродными материалами, $\text{кг}/\text{см}^2$;

Δ – горизонтальное смещение опоры у пяты свода, см , при $N = 1$ кг;

n – коэффициент, принимаемый в зависимости от подъема свода в ключе.

Для описания напряженно-деформированного состояния свода принято дифференциальное уравнение вида:

$$Ku + C\dot{u} + M\ddot{u} + F = 0, \quad (4)$$

где u – вектор перемещений, K – матрица жесткости, C – матрица демпфирования, M – матрица масс, F – вектор действующих нагрузок.

Последнее дифференциальное уравнение зависит от времени, перемещений, физических свойств и геометрии, тогда матрицу жесткости представим в виде:

$$\frac{1}{2} \dot{\varphi}^T s dlw = \frac{1}{2} \dot{\varphi}^T D edlw. \quad (5)$$

Тензор D осуществляет связь физических и геометрических свойств, при этом в дискретно армированном своде непредсказуемым скачкообразным образом меняет свои свойства с одного известного состояния, на другое тоже известное.

Используя меру множества $m(w)$, по которой осуществляется интегрирование, вместо W , которой будет обозначать интегрирование с объемной мерой, получаем интеграл вида:

$$\frac{1}{2} \dot{\varphi}^T s dlm(w) = \frac{1}{2} \dot{\varphi}^T D edlm(w), \quad (6)$$

Таким образом, элемент объема можно разложить на меры входящих в него компонент:

$$dlw = dl(m_k(w) + m_{\text{арм.}}(w)) = dlm_k(w) + dlm_{\text{арм.}}(w), \quad (7)$$

При этом должно соблюдаться условие $\sum_{i=1}^n a_i = 1$ нормировки объемных долей.

Исходя из вышесказанного, приходим к известной гипотезе Фойгта, заключающейся в том, что в опытах на сжатие/растяжение деформации по всему объему композитного материала постоянны.

Это достаточно обосновано, если предполагается совместное деформирование всех компонент между собой и предполагается единство в среднем деформаций.

В случае нарушения совместности деформирования компонент композитного материала, можно записать выражение для напряжений и матрицу податливостей в предположении, что сложение производится пропорционально объемным долям для матрицы податливости компонент. Тогда можно записать цепочку равенств:

$$\frac{1}{2} \sum_{n=1}^n \dot{\varphi}^T D_i edlw = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^n \dot{\varphi}^T P_i s dlw = \frac{1}{2} \dot{\varphi}^T \sum_{\epsilon=1}^n \frac{\alpha^n}{\epsilon} P_i \frac{\ddot{\varphi}}{\varnothing} s dlw = \frac{1}{2} \dot{\varphi}^T \sum_{\epsilon=1}^n \frac{\alpha^n}{\epsilon} P_i \frac{\ddot{\varphi}^{-1}}{\varnothing} s dlw, \quad (8)$$

Предположение об осреднении податливостей согласно гипотезе Райса, более предпочтительно для усиления углеродными полотнами, так как нельзя гарантировать полное совместное деформирование, а совместное деформирование пойдет в запас прочности.

На основе выше принятых положений предлагается следующая запись для приведенного модуля деформации:

$$E_{\text{прив}}^k = 0,5 \left(E_0 \gamma_{\mu i} + E_y \frac{\sum_{i=0}^b A_y}{A_k} \gamma_{\epsilon i} \right) \gamma_n, \quad (9)$$

E_0 – модуль деформаций кладки, $\text{кг}/\text{см}^2$;

E_y – модуль деформаций углеродного холста, $\text{кг}/\text{см}^2$;

$\sum_{i=0}^b A_y$ – общая площадь элементов усиления, см^2 ;

$\gamma_{\mu i}$ – коэффициент, учитывающий подготовку основания свода;

$\gamma_{\epsilon i}$ – коэффициент, учитывающий процент усиления свода;

γ_n – коэффициент, учитывающий неупругие деформации свода, возникшие в ходе эксплуатации свода.

Прочность поперечного сечения свода предлагается рассматривать исходя из представленной расчетной схемы (рис. 3).

Изгибающие моменты, возникающие, в поперечных сечениях свода предлагается определять по известным выражениям пособия к СНиП II-22-81, с учетом координат опасного сечения:

$$M = M_0 - H_y, \quad (10)$$

где M_0 – изгибающий момент в простой балке при параболической нагрузке в сечении, расположенном на расстоянии x от левой опоры, определяют по известной формуле [8]:

$$M_0 = V_A x - \frac{g_1 x^2}{2} + \frac{(g_1 - g_x) x^2}{4}, \quad (11)$$

где g_x – величина дополнительной постоянной нагрузки, вызываемой уклоном свода в сечениях, отстоящих на расстоянии x от опоры, Н/м (кгс/м);

g_1 – постоянная нагрузка в ключе свода, Н/м (кгс/м);

x и y – абсцисса и ордината рассматриваемого сечения.

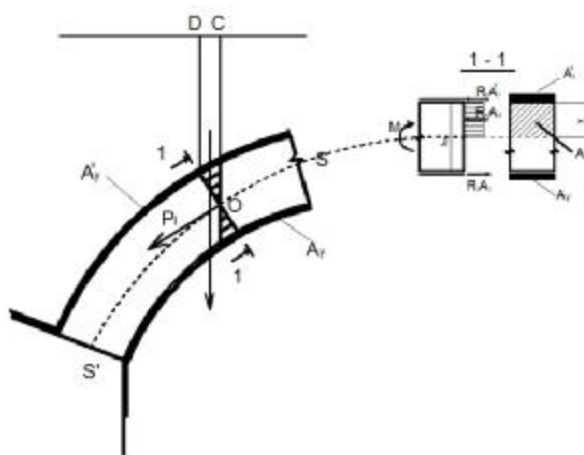


Рис. 3. Расчетная схема для определения прочности поперечного сечения свода усиленного углеродным холстом

Проверку прочности свода, по нормальным сечениям предлагается проводить следующим образом:

$$M < [R_k b x (h_0 - 0,5x) \gamma_{01} + R_y A_y^l h_0 \gamma_{02}] \gamma_m, \quad (12)$$

$$x = \frac{R_y A_y \gamma_{01} - R_y A_y^l \gamma_{02}}{R_k b}, \quad (13)$$

где x – высота сжатой зоны, м;

R_k – расчетное сопротивление каменной кладки сжатию, МПа;

R_y – расчетное сопротивление углеродного холста растяжению, МПа;

h_0 – высота сечения свода в расчетном сечении, м;

b – ширина свода, м;

γ_{01} – коэффициент условий работы, учитывающий обжатие сжатой зоны каменного свода при наклейке углеродного холста, в практических расчетах рекомендуется принимать не более $\gamma_{01} = 1,2$;

γ_{02} – коэффициент условий работы, учитывающий предварительное напряжение растянутой зоны углеродного холста при наклейке в растянутой зоне, в практических расчетах рекомендуется принимать не более $\gamma_{02} = 1,6$;

γ_m – коэффициент, учитывающий совместную работу элементов усиления и каменного свода, в практических расчетах рекомендуется принимать не более $\gamma_m = 1,2$.

Список библиографических ссылок

1. Отчёты по НИР (за 2012-2015 гг.). Попов А.О., Матвеев И.Ю., Бирюлева Д.К. и др. Отчеты об обследовании технического состояния строительных конструкций исторических зданий // ООО ЦТСС «ЭкспертПроектСтрой». – Казань, 2012-2015 гг.
2. Архивные материалы (за 2012-2015 гг.). Матвеев И.Ю., Попов А.О., Бирюлева Д.К. и др. Архивные материалы по проведению авторского надзора // ООО ЦТСС «ЭкспертПроектСтрой». – Казань, 2012-2015 гг.
3. Лахтин Н.К. Расчет арок и сводов. – М.: Студенческое издательское общество при Императорском Московском Техническом Училище, 1911. – 290 с.
4. Бернгард В.Р. Арки и своды. – СПб.: Институт гражданских инженеров, 1901. – 128 с.
5. Кравчук А.С., Майборода В.П., Уржумцев Ю.С. Механика полимерных и композиционных материалов: – М.: Наука, 1985, – 304 с.
6. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1988. – 712 с.
7. СНиП II-22-81*. Каменные и армокаменные конструкции. Нормы проектирования // Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 1999.
8. Пособие по проектированию каменных и армокаменных конструкций (к СНиП II-22-81) // ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко Госстроя СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989.

Popov A.O. – candidate of technical sciences

E-mail: a.o.popov@yandex.ru

Matveev I.Y. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: matigur@mail.ru

Kuramshin K.V. – student

E-mail: kuramschin@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

The strength of normal sections and deformability of brick cylindrical vaults reinforced by carbon canvases**Resume**

The preservation of architectural heritage in everything contributes to the policy of the state and its subordinate ministries and agencies, which is that all the owners of buildings that have historical and cultural value, get security obligations, which defines the subjects of protection and the degree of their values. As a rule, in the presence of the vaulted ceiling in the list of «protection» of the building they are in the first place. Work on the reconstruction and restoration of buildings of historic value, start from the engineering and historical and cultural studies, on the basis of which already is a clear task to develop constructive solutions to strengthen and restore. In connection with work on engineering and technical examination are fundamental, and therefore should be carried out carefully and in detail so as not to leave any innuendo and gaps. Often a survey of the building begins long before the start of construction, and sometimes in another existing building, which greatly complicates the examination of, and reduces to a minimum and not required for the description of the building the number of pits and autopsies. The latter significantly reduces the quality of the survey – initial data for designing. Really soaking, laying destruction of a species, crack of disclosure at the bottom of the arch are easily diagnosed and can be seen with the naked eye the shear cracks in the same area may not exceed 150 microns, which is not easy to discern in a special magnifying glass. The latter leads to the fact that not considered a main crack disclosure on the other side (top) cross-section (fig. 1).

In the present work by the authors on the basis of engineering studies [1, 2] provides a classification of schemes of destruction barrel vaults, as well as propose a methodological approach to restoring a healthy state.

Keywords: historical and cultural monuments, engineering restoration, reconstruction, structural solutions.

Reference list

1. Reports on research work (2012-2015). Popov A.O., Matveev I.Y., Biryuleva D.K. and others. Reports on the examination of technical condition of building structures historic buildings // Ltd. CTSC «EkspertProetkStroy». – Kazan, 2012-2015.
2. Archival materials (2012-2015). Matveev I.Y, Popov A.O., Berulava D.K. and others. Archival materials under the supervision // Ltd. CTSC «EkspertProetkStroy». – Kazan, 2012-2015.
3. Lakhtin N.K. To the calculation of arches and vaults. – M.: Student publishing society at the Imperial Moscow Technical School, 1911. – 290 p.
4. Bernhard V.R. Arches and vaults. – SPb: Institute of civil engineers, 1901. –128 p.
5. Kravchuk S.A., Mayboroda V.P., Urzhumtsev Y.S. Mechanics of polymer and composite materials: – M.: Nauka, 1985, – 304 p.
6. Rabotnov Y.N. Mechanics of deformable solids: – M.: Nauka, 1988. – 712 p.
7. SNiP II-22-81*. Masonry and reinforced masonry structures. Design standards // Gosstroy of Russia. – M.: sue CSE, 1999.
8. Manual for design of masonry and reinforced masonry structures (to SNiP II-22-81) // tsniisk them. V.A. Kucherenko Gosstroy of the USSR. – M.: CИTP Gosstroy of the USSR, 1989.