

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА / TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2024.55.4>

АЛГОРИТМ ПРИНЯТИЯ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ УСИЛЕНИЯ КАМЕННЫХ СВОДЧАТЫХ СООРУЖЕНИЙ

Научная статья

Ибрагимов Р.А.<sup>1</sup>, Верясов С.А.<sup>2</sup>\*

<sup>1</sup>ORCID : 0000-0001-8879-1190;

<sup>1,2</sup> Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Казань, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (veriasov.sergei[at]yandex.ru)

**Аннотация**

Сохранение исторических памятников является одним из важнейших актуальных вопросов не только в области архитектуры, но и в области технологии. В настоящее время в нормативных документах отсутствуют организационно-технологические решения при усилении каменных сводов, в связи с этим возникает необходимость в разработке такой методики.

Выполненный анализ литературы показывает, что существующая нормативная база и научные исследования отражают экспериментальные и математические аспекты усиления, в то время как технология и контроль качества выполнения работ по технологии усиления практически отсутствуют. В данной работе приведены основные критерии, влияющие на выбор усиления, а также выдвинут ряд предложений по алгоритму принятия решений выбора способа усиления.

Предложена сравнительная таблица и алгоритм усиления каменных сводов, которые позволяют проектировщикам оценивать как экономическую составляющую будущего проекта, так и более подробно разрабатывать организационно-технологическую документацию при выполнении усиления.

**Ключевые слова:** усиление, каменный свод, инъектирование.

ALGORITHM OF ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR REINFORCEMENT OF STONE ARCH STRUCTURES

Research article

Ibragimov R.A.<sup>1</sup>, Veriasov S.A.<sup>2</sup>\*

<sup>1</sup>ORCID : 0000-0001-8879-1190;

<sup>1,2</sup> Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

\* Corresponding author (veriasov.sergei[at]yandex.ru)

**Abstract**

Preservation of historical monuments is one of the most important topical issues, not only in the field of architecture, but also in that of technology. At present, the normative documents lack organizational and technological solutions for reinforcing stone arches, therefore, there is a necessity to develop such a methodology.

The analysis of the literature shows that the existing regulatory framework and scientific studies reflect experimental and mathematical aspects of reinforcement, while the technology and quality control of reinforcement technology are practically absent. In this work, the main criteria influencing the choice of reinforcement are given, and a number of proposals for a decision-making algorithm for the choice of reinforcement method are put forward.

A comparative table and an algorithm for reinforcing stone arches are proposed, which allow designers to evaluate both the economic component of the future project and to develop organizational and technological documentation in more detail when performing reinforcement.

**Keywords:** reinforcement, stone arch, injection.

**Введение**

Практика строительства из природного и искусственного камня значительно опережала развитие науки о каменных конструкциях. В силу этого вместо расчета каменных конструкций на прочность и устойчивость в XIX веке были выработаны эмпирические правила возведения каменных зданий и сооружений, которые не могли учесть всего разнообразия работы сложных каменных сооружений. До тридцатых годов 19 века каменные конструкции проектировались либо по эмпирическим правилам, либо по формулам сопоставления материалов, справедливым лишь для идеально упругих материалов. Основными причинами отставания теории расчета каменных конструкций от практики явились: возможность повторения накопленного опыта строительства; недостаточность знаний о физико-механических свойств кладки; отсутствие современного лабораторного оборудования для проведения экспериментальных работ и, в некоторых случаях, недопустимость применения метода подobia для обоснования прочности и устойчивости каменных конструкций [1].

При этом в настоящее время в нормативной базе отсутствуют организационно-технологические решения (ОТР) усиления каменных сводов.

Целью данной статьи является создание алгоритма для определения метода усиления сводчатых каменных конструкций в зависимости от организационно-технологических факторов.

В соответствии с указанной целью были сформулированы следующие задачи исследования:

- рассмотреть конструкции сводов;
- изучить существующие методы усиления;
- сравнить основные показатели существующих методов усиления;
- провести изучение факторов, влияющих на определение способа усиления.

#### **Конструктивные решения каменных сводчатых конструкций**

В течение многих столетий возводились сводчатые конструкции перекрытий и покрытий. Наибольшее распространение они получили при строительстве культовых зданий и сооружений, и в гражданских зданиях (см. рис. 1).

При реконструкции гражданских зданий, не относящихся к объектам культурного наследия, собственник вправе демонтировать свод, если его состояние неудовлетворительно, в то время как в объектах культурного наследия замена и демонтаж данных конструкций не допускается.

Каменные своды можно разделить на две группы:

1) цилиндрические – образует в поперечном сечении полукруг (или половину эллипса, параболы). Это простейший и наиболее распространённый тип сводов. Перекрытие в нём опирается на параллельно расположенные опоры – две стены, ряд столбов или аркады;

2) сферические или своды двойкой кривизны, имеющие образующими кривые линии [2].

Среди цилиндрических сводов наиболее распространёнными являются следующие типы:

– цилиндрические, где пяты сводов опираются на параллельные стены или перекрытия этажа, передавая тем самым нагрузку на них;

– сомкнутые, где пяты сводов опираются на все стены по периметру свода и передают вертикальную нагрузку и распор по всей длине опирания, при этом свод стремится к центру помещения;

– крестовые, образуется двумя перпендикулярными цилиндрическими сводами, пяты сводов опираются на параллельные стены, в пересечении тем самым образуя пространство без балок или перекрытий, увеличивая объем пространства;

– зеркальный свод, данный свод чаще всего применялся в архитектурных целях, поэтому не передавал вышележащую нагрузку на стены или перекрытия;

– сложные или прусские своды, наиболее известны как «своды Монье». Конструкция данного свода состоит из двух основных элементов – балок, на которые воздействует нагрузка и передается на стены, и цилиндрические своды малого пролета, которые разбивают площадь перекрытия на небольшие арки, тем самым получая аркаду из арок.

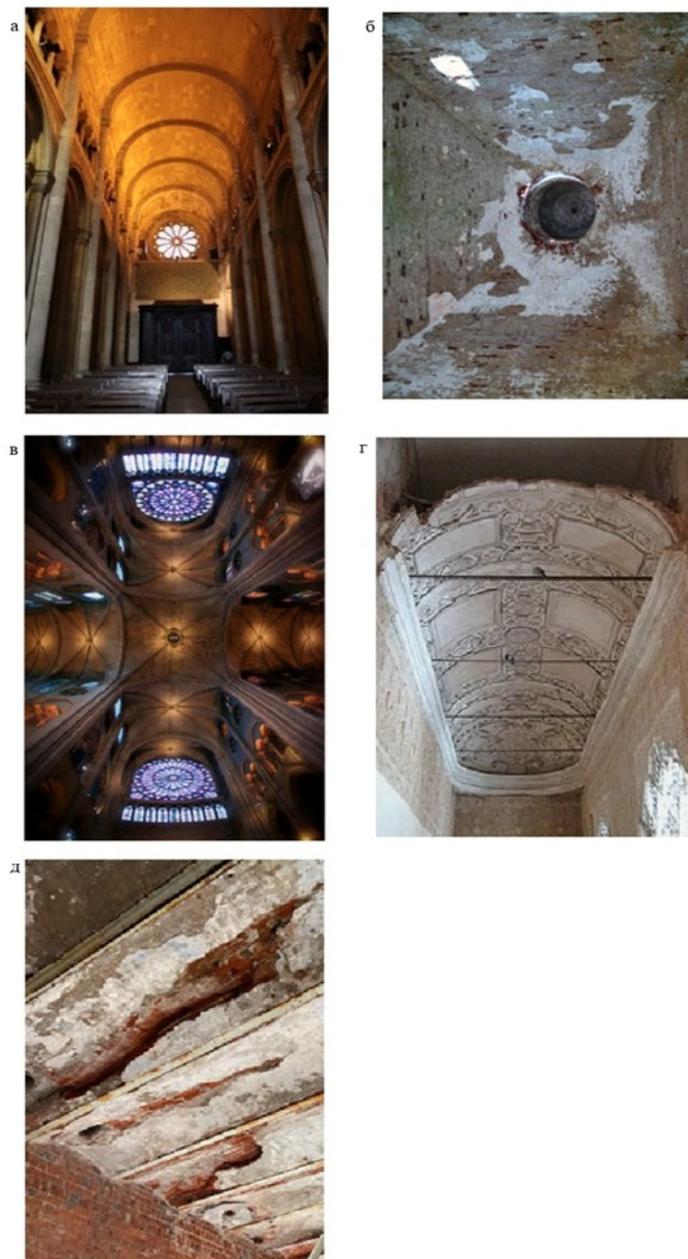


Рисунок 1 - Классификация цилиндрических сводов

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2024.55.4.1>

*Примечание: а) цилиндрический свод (Лиссабонский собор); б) сомкнутый свод (Свод Никольской церкви в Никульском Комсомольского района Ивановской области); в) крестовый свод (Собор Парижской Богоматери или Нотр-Дам-де-Пари в Париже); г) Зеркальный свод с кирпичным зеркалом (Зеркальный свод в Альгамбре – Испания); д) свод Монье (Здание по ул. Габдулы Тукая 97, г. Казань)*

Среди сферических сводов наибольшее распространение получили купольные своды в культовом строительстве (храмы, церкви), а также парусные своды в гражданском строительстве (подвалы, хранилища и т.п.) (см. рис. 2).

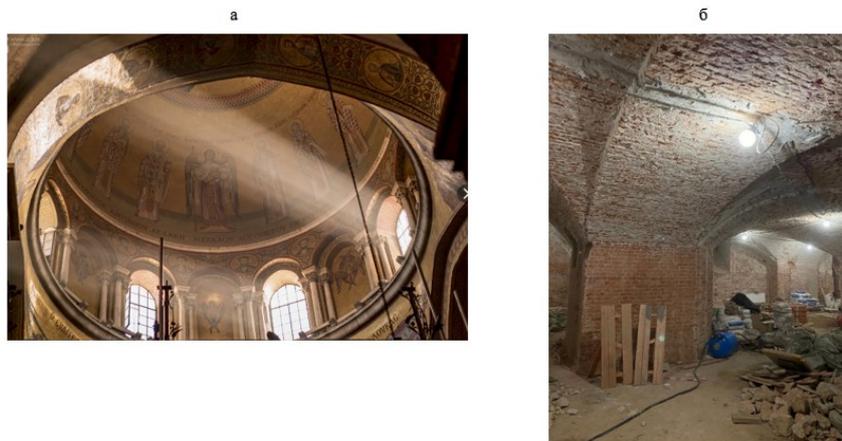


Рисунок 2 - Классификация сферических сводов  
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2024.55.4.2>

Примечание: а) купольный свод (Свод в монастыре Ставроникиты); б) парусный свод Подвал Собора Святого Апостола Павла в городе Гатчина

В то же время в одном здании могут находиться два и более видов сводов. Существует классификация, характеризующая и стрелу подъема свода. Своды с подъемом больше  $\frac{1}{2} l$  ( $l$  – пролёт), называются возвышенными, меньше  $\frac{1}{2} l$  – сжатыми [2].

Над проблемой усиления каменных сводчатых конструкций работали как отечественные, так и зарубежные ученые. Павловым В.В. и Хорьковым Е.В. [3], [4] были проделаны исследования как численные, так и физические эксперименты в области восстановления и усиления кирпичных арок, а также получены патенты на усиления каменных сводчатых перекрытий.

Фабричной К.А. [5] было рассмотрено усиление свода «Монье» композитными материалами, которое подтвердило эффективное использование данных материалов. Зарубежные ученые также проводят экспериментальные исследования с композитными материалами, например, Sukran Tanriverdi [6], рассматривает различные способы нанесения композитных материалов и показывает, что данный тип усиления позволяет увеличить несущую способность от 45 до 85%.

### Существующие методы усиления каменных конструкций

Конструкции усиления получили свое развитие в большей степени за счет получения более качественной расчетной модели, проведения экспериментов [3], [4], [5], [6], [7], в то время как сами способы усиления не совершенствовались, а технология при усилении прописывалась типовая или не прописывалась вовсе. Также не учитывались и особенности технологии и организации при производстве таких усилений, так как данные работы не имели массового применения.

Основные методы усиления каменных конструкций приведены в работе [8]. Исходя из общих признаков, можно выделить две большие группы по способу усиления: открытый и закрытый способ. На рисунке 3 представлен анализ этих методов.

Сводная сравнительная таблица при выполнении СМР для каждого из анализируемых методов представлена в табл. 1.



Рисунок 3 - Блок схема существующих методов усиления  
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2024.55.4.3>

Таблица 1 - Сравнительная таблица различных способов усиления

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2024.55.4.4>

Способ усиления	Увеличение массы свода, кг/м <sup>2</sup>	Квалификаци я рабочих, ср. разряд	Материалоём кость, кол-во материала необходимого для усиления, м <sup>3</sup> материала на 100 м <sup>2</sup> усиления	Стоимость м <sup>2</sup> усиления, руб.	Минимально е количество специализиро ванных средств механизации, кол-во	Сложность контроля качества, (стоимость проведения контроля качества, прибора), руб. за м <sup>2</sup>	Процентное увеличение несущей способности к первоначальн ому, %	Средняя численность рабочих, чел.	Возможность производства работ при отрицательны х температурах
Торкретирова ние	200-400	4	10-15	4000-8000	1-2	15000-25000	20-40	3	+
Стальные тяжи	10-20	4,1	0,1-0,2	1500-5000	0	70000-150000	10-20	2	+
Композитные материалы	0,5-1,5	4,2	0,2-0,5	40000-60000	0	5000-10000	45-80	1	-
Увеличение сечения	30-100	4,2	5-8	1500-5000	1-3	15000-150000	20-30	4	+

Способ усиления	Увеличение массы свода, кг/м <sup>2</sup>	Квалификация рабочих, ср. разряд	Материалоёмкость, кол-во материала необходимого для усиления, м <sup>3</sup> материала на 100 м <sup>2</sup> усиления	Стоимость м <sup>2</sup> усиления, руб.	Минимальное количество специализированных средств механизации, кол-во	Сложность контроля качества, (стоимость проведения контроля качества, прибора), руб. за м <sup>2</sup>	Процентное увеличение несущей способности к первоначальному, %	Средняя численность рабочих, чел.	Возможность производства работ при отрицательных температурах
Инъектирование	20-40	4,5	2-5	4000-20000	1-2	250000-500000	30-40	2	+

Каждый из рассмотренных методов применяется на практике и имеет свои достоинства и недостатки. С одной стороны композитные материалы показывают высокий процент по увеличению несущей способности, а с другой стороны – наибольшую стоимость за м<sup>2</sup> усиления, необходимость высокой квалификации рабочих, большой перечень подготовительных работ [9], невозможность работы при отрицательных температурах. Выбор проектировщиком наиболее верного и рационального метода усиления должен производиться с учетом всех вышеперечисленных факторов.

#### **Методика выбора усиления каменных сводов**

При выборе методики усиления в первую очередь необходимо определить, какая конструкция здания имеет наибольшее влияние на деформацию свода, так как зачастую неработоспособность свода не зависит от него самого напрямую. Почти всегда неравномерность осадок влияет на конструктивную целостность здания, образование трещин, крен и прочие дефекты [10], [11]. Поэтому важно на стадии обследования здания выявить именно ту конструкцию, которая влияет на работоспособность свода и усилить ее, иначе в процессе усиления свода, например, торкретированием, где наблюдается увеличение массы свода (табл. 1), может произойти обрушение конструкции.

При необходимости сохранения облика сооружения, например, исторических фресок, лепнин, наиболее подходящим способом усиления является закрытый метод – инъецирование. Данный способ позволяет усилить конструкцию свода без ее значительных «повреждений». Согласно этому методу, в своде пробуриваются отверстия небольшого диаметра в швах кладки или в самом кирпиче, тем самым позволяя сохранить большую площадь без изменений ее первоначального состояния. По сравнению с другими способами, где происходит значительное увеличение массы конструкции вследствие увеличения сечения, в данном методе масса увеличивается незначительно. Но стоит выделить несколько факторов, которые обязательно нужно учитывать при данном методе усиления: прочность и целостность самого кирпича, адгезию существующего раствора, процентное заполнение раствором швов, так как инъецирование происходит под давлением и кирпичную кладку свода может выдавить заполняемым раствором.

Не типовые конструкции усиления характеризуется многофакторностью принятия решения, образуя тем самым алгоритм, который строится на основе уже существующей нормативной базы, способов усиления, а оптимальный выбор зависит от многих факторов. Алгоритм принятия решений при выполнении усиления каменных сводчатых конструкций представлен на рис. 4.

Из рис. 4 следует, что в некоторых случаях для восстановления работоспособности свода усиление только фундамента недостаточно, тогда необходимо перейти на следующую конструкцию. Данный в блок-схеме алгоритм необходимо повторять до тех пор, пока не будет найдена именно та конструкция, которая оказывает наибольшее влияние на деформацию свода. На практике может оказаться, что необходимо осуществить усиление всех конструкций здания.

При переходе в разработанной блок-схеме к своду, как основному объекту усиления, необходимо задать влияющие факторы. Эти факторы могут дополняться в зависимости от первоначальных условий. Однако стоит выделить два основных фактора, в зависимости от которых и определяется способ усиления – увеличение массы свода; сохранение его исторического облика.

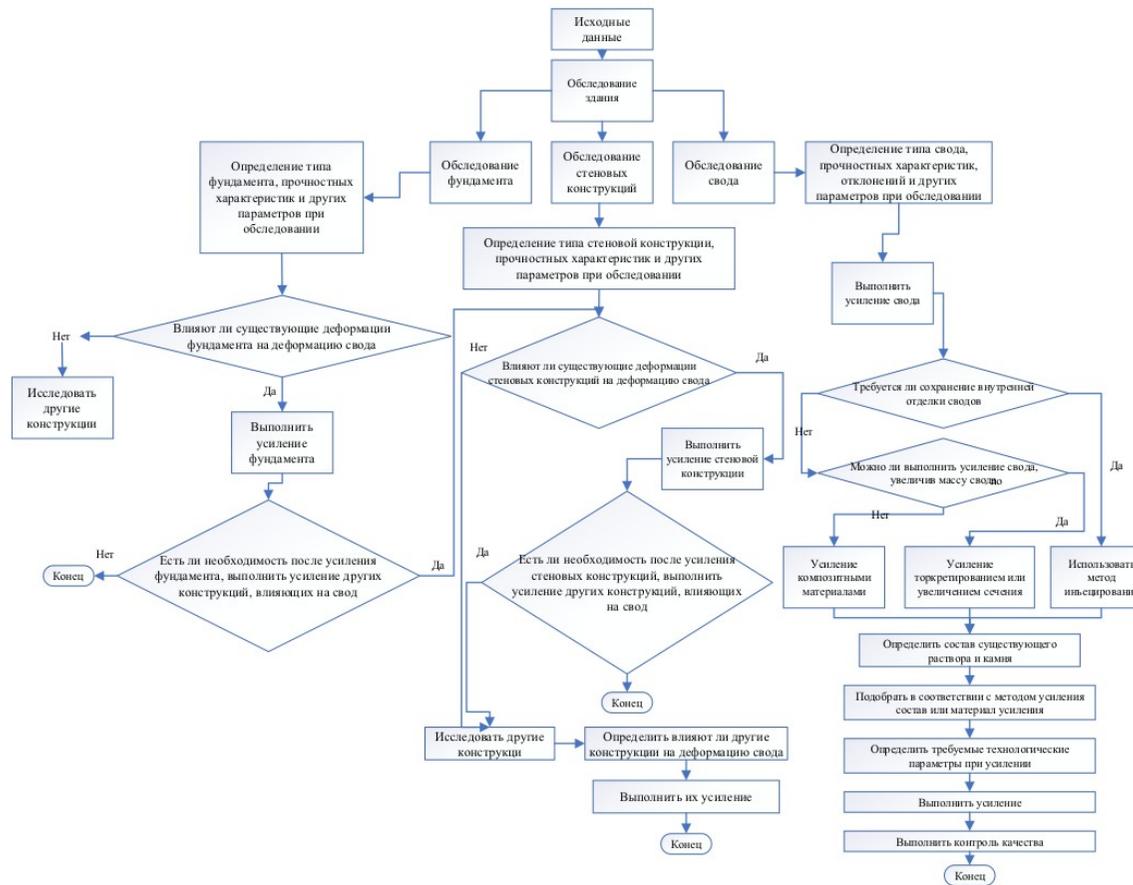


Рисунок 4 - Алгоритм принятия решений при выполнении усиления каменных сводчатых конструкций  
 DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2024.55.4.5>

**Заключение**

В данной работе выполнен краткий обзор существующих каменных сводов, дана их общая классификация и описание, приведены основанные критерии, влияющие на выбор усиления, а также выдвинут ряд предложений по алгоритму принятия решения выбора способа усиления.

Выполнен анализ существующих усилений каменных сводов и составлена сравнительная таблица каждого из рассматриваемых методов по 9-ти основным параметрам.

Разработаны рекомендации в виде блок-схемы (алгоритма), позволяющие оптимизировать как поиск необходимой конструкции, влияющий на деформацию свода, так и рекомендации по усилению самого свода в зависимости от имеющихся исходных данных при обследовании, а также и факторов, влияющих на способ усиления.

Анализ научной и нормативной литературы показал, что отсутствуют методы контроля качества и показателей трудоемкости рассматриваемых методов усиления, что не позволяет выполнять технологические процессы усиления менее трудозатратно, что и является направлением дальнейших исследований.

**Благодарности**

Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан».

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Рецензия**

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

**Acknowledgement**

The work was carried out at the expense of the grant of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, provided to young candidates of sciences (postdoctoral fellows) for the purpose of defending a doctoral dissertation, performing research work, as well as performing labour functions in scientific and educational organizations of the Republic of Tatarstan as part of the State Programme of the Republic of Tatarstan "Scientific and Technological Development of the Republic of Tatarstan".

**Conflict of Interest**

None declared.

**Review**

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

**Список литературы / References**

1. Еременок П.Л. Каменные и армокаменные конструкции / П.Л. Еременок, И.П. Еременок. — Киев : Вища Школа, 1981. — 223 с.
2. Рябухина С.А. Каменные сводчатые конструкции: история, классификация, применение / С.А. Рябухина // Строительство уникальных зданий и сооружений. — 2015. — № 6 (33). — С. 87–97.
3. Павлов В.В. Восстановление работоспособности каменных арок и сводов / В.В. Павлов, Е.В. Хорьков // Вестник гражданских инженеров. — 2017. — № 6 (65). — С. 65–70.
4. Соколов Б.С. Экспериментальные исследования работы усиленных кирпичных арок при вертикальной подвижке опор / Б.С. Соколов, В.В. Павлов, Е.В. Хорьков // Известия КГАСУ. — 2014. — № 4. — С. 158–164.
5. Фабричная К.А. К вопросу усиления сводов (типа "Монье") композитными материалами при реконструкции / К.А. Фабричная, К.И. Шарафутдинова // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. — 2019. — № 4 (50). — С. 210–219. — EDN VHZZWRK.
6. Tanriverdi Ş. An experimental and numerical study of the strengthening of masonry brick vaults / Ş. Tanriverdi // Structures. — 2023. — № 47. — P. 799–813.
7. Khorkov E. Experimental investigation of the deformability of the masonry vault in church historical building / E. Khorkov, E. Mindubaev, V. Pavlov [et al.] // Case Studies in Construction Materials. — 2023. — № 18. — 18 p.
8. Бессонов Г.Б. Исследование деформаций, расчет несущей способности и конструктивное укрепление древних распорных систем / Г.Б. Бессонов // Методические рекомендации. Серия: Реставрационные нормативы. — Москва : Объединение "Росреставрация", 1989. — 164 с.
9. СТО 38276489.002-2017. Усиление каменных и армокаменных конструкций композитными материалами. — Москва, 2017.
10. Юркин Ю.В. Исследование причин образования трещин в кирпичных стенах / Ю.В. Юркин, В.В. Авдонин, О.В. Сеницына [и др.] // Новые технологии и проблемы технических наук : сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции, Красноярск, 11 ноября 2017 года. — Вып. IV. — Красноярск : Инновационный центр развития образования и науки, 2017. — С. 62–66. — EDN YQXKNY.
11. Ющубе С.В. Оценка надежности кирпичного здания на свайном фундаменте в условиях развития неравномерных осадок / С.В. Ющубе, И.И. Подшивалов, А.А. Тарасов [и др.] // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. — 2022. — Т. 24. — № 1. — С. 202-215. — DOI 10.31675/1607-1859-2022-24-1-202-215.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Eremenok P.L. Kamennye i armokamennye konstrukcii [Stone and reinforced masonry structures] / P.L. Eremenok, I.P. Eremenok. — Kiev : Vishha Shkola, 1981. — 223 p. [in Russian]
2. Riabuhina S.A. Kamennye svodchatye konstrukcii: istorija, klassifikacija, primenenie [Stone vaulted structures: history, classification, application] / S.A. Riabuhina // Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzhenij [Construction of Unique Buildings and Structures]. — 2015. — № 6 (33). — P.87–97. [in Russian]
3. Pavlov V.V. Vosstanovlenie rabotosposobnosti kamennyh arok i svodov [Structural rehabilitation of masonry arches and vaults] / V.V. Pavlov, E.V. Khor'kom // Vestnik grazhdanskih inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]. — 2017. — № 6 (65). — P. 65–70. [in Russian]
4. Sokolov B.S. Jeksperimental'nye issledovanija raboty usilennyh kirpichnyh arok pri vertikal'noj podvizhke opor [Experimental research of strengthening brick arches functioning according to vertical slip of pillar] / B.S. Sokolov, V.V. Pavlov, E.V. Hor'kov // Izvestija KGASU [Proceedings of KSASU]. — 2014. — № 4. — P. 158–164. [in Russian]
5. Fabrichnaya K.A. K voprosu usilenija svodov (tipa "Mon'e") kompozitnymi materialami pri rekonstrukcii [On the issue of strengthening vaults ("Monier" type) with composite materials in the reconstruction] / K. A. Fabrichnaya, K. I. Sharafutdinova // Izvestija Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta [Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering]. — 2019. — № 4 (50). — P. 210–219. — EDN VHZWRK. [in Russian]
6. Tanriverdi Ş. An experimental and numerical study of the strengthening of masonry brick vaults / Ş. Tanriverdi // Structures. — 2023. — № 47. — P. 799–813.
7. Khorkov E. Experimental investigation of the deformability of the masonry vault in church historical building / E. Khorkov, E. Mindubaev, V. Pavlov [et al.] // Case Studies in Construction Materials. — 2023. — № 18. — 18 p.
8. Bessonov G.B. Issledovanie deformacij, raschet nesushhej sposobnosti i konstruktivnoe ukreplenie drevnih raspornyh sistem. Metodicheskie rekomendacii [Study of deformations, calculation of bearing capacity and constructive strengthening of ancient spacer systems. Methodical recommendations] / G.B. Bessonov // Serija: Restavracionnye normativy [Series: Restoration norms]. — Moscow : Association "Rosrestavratsiya" 1989. — 164 p. [in Russian]
9. STO 38276489.002-2017. Usilenie kamennyh i armokamennyh konstrukcij kompozitnymi materialami [STO 38276489.002-2017. Reinforcement of stone and reinforced stone structures with composite materials]. — Moscow, 2017. [in Russian]
10. Jurkin Ju.V. Issledovanie prichin obrazovanija treshhin v kirpichnyh stenah [Study of the causes of crack formation in brick walls] / Ju.V. Jurkin, V.V. Avdonin, O.V. Sinicya [et al.] // Novye tehnologii i problemy tehniceskikh nauk [New Technologies and Problems of Technical Sciences] : collection of scientific papers on the results of the International Scientific and Practical Conference, Krasnoyarsk, 11 November 2017. — Issue IV. — Krasnoyarsk : Innovation Centre for Education and Science Development, 2017. — P. 62–66. — EDN YQXKNY. [in Russian]
11. Jushhube S.V. Ocenka nadezhnosti kirpichnogo zdaniya na svajnom fundamente v uslovijah razvitiya neravnomernyh osadok [Reliability of brick building on pile foundation in relative settlement conditions] / S. V. Jushhube, I.I. Podshivalov, A.A. Tarasov [et al.] // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta [Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering]. — 2022. — Vol. 24. — № 1. — P. 202–215. — DOI 10.31675/1607-1859-2022-24-1-202-215. [in Russian]