

УДК 692.6

К вопросу восстановления каменных бескосоурных лестниц в архитектуре Санкт-Петербурга. Часть 1

М. Д. Вебер¹, А. В. Кузнецов²

¹ООО «Инфорспроект», Российская Федерация, 115280, Москва, ул. Ленинская слобода, 19

²Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Вебер М. Д., Кузнецов А. В. К вопросу восстановления каменных бескосоурных лестниц в архитектуре Санкт-Петербурга. Часть 1 // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 509–530. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-509-530

Аннотация

Цель: Осветить имеющийся инструментарий для обследований технического состояния бескосоурных каменных лестниц. **Материалы и методы:** Проведены архивные исследования. Выполнен анализ и сравнение проведенных ранее научных и практических исследований в данной области. **Результаты:** Собраны актуальные данные для проведения поверочных расчетов существующих конструкций. Даны рекомендации по учету опыта проектирования, строительства и эксплуатации объектов исследования. Сформулированы направления дальнейших исследований. **Практическая значимость:** Предоставление практикующим инженерам основания для бережения ценных исторических конструкций, восстановление которых с сохранением их первоначальной схемы работы в настоящее время усложнено.

Ключевые слова: Каменные конструкции, бескосоурные лестницы, висячие лестницы, обследование, реконструкция, реставрация.

Введение

В практике инженерной работы на исторических зданиях нередко встречаются строительные конструкции, для которых возникает дилемма отсутствия нормативов или общепринятых подходов к обследованию и проектированию.

Данная ситуация сложилась исторически из-за утраты знаний и производственной базы, использовавшихся при первоначальном возведении объектов в прошлом. Дело в том, что массовое строительство как отрасль в каждый момент времени предполагает совокупность методологии (научной и нормативной базы, квалификации изыскателей, проектировщиков, строителей), материальных ресурсов (сырья, строительных материалов) и производственных мощностей (инструментов и механизмов), характерных для данного этапа

научно-технического развития. В рамках перехода от одного этапа к другому происходит трансформация всего отраслевого организма.

Этот процесс является существенным фактором работы с историческими конструкциями, так как инженеру приходится постоянно искать разумный способ уложить физический объект, существующий иногда веками, в «прокрустово ложе» современных норм, материалов и мощностей.

Для каждого исторического периода и географической точки в указанную «серую зону» попадают свои типы элементов. В настоящей статье авторы постарались осветить возможные методы оценки технического состояния бескосоурных, так называемых «висячих» каменных лестниц, характерных для застройки второй половины XIX — начала XX века в Санкт-Петербурге.

История и типология

В соответствии со словарем В. И. Плужникова [1, с. 35] висячая лестница — это «не имеющая столбчатых опор лестница, ступени которой заделываются одним концом в кладку стены, а другой остается незакрепленным».

Образцы такого типа конструкций возводились уже в античности. Отдельные древние экземпляры сохранились до наших дней (рис. 1). Тем не менее в мировой практике исследований считается, что прообразом поздних висячих лестниц XIX–XX вв. [2] является спиральная каменная лестница овальной геометрии в плане, возведенная итальянским архитектором А. Палладио в 1560 г. в Венеции (рис. 2).

К наиболее ранним образцам висячих каменных лестниц в Петербурге можно отнести лестницу павильона «Шапель» в Царском селе (1825–1828 гг.) (рис. 3), а также спиральные лестницы в звонницах Исаакиевского собора (1818–1858 гг.) (рис. 4). В приведенных примерах ступени выполнены из гранита.

В типологии висячих каменных лестниц исторических зданий Петербурга можно выделить две основные функциональные группы: парадные

и черные. В обеих группах встречаются двухмаршевые, трехмаршевые, многомаршевые, спиральные решения. Лестничные клетки отличаются богатым разнообразием геометрии в плане.

Парадные висячие каменные лестницы (рис. 5, 6) являются уникальными объектами. Для них характерно обилие архитектурных деталей, ажурность, обтекаемость ступеней с нижней стороны. Кроме известняка в таких лестницах можно встретить мрамор или гранит. Количество этих лестниц в городе невелико, и каждая требует отдельных исследований.

Большинство висячих каменных лестниц в Петербурге, возведенных до революции, — *черные* (рис. 7, 8). Основной причиной этому послужило рекомендуемое ограничение ширины марша до 1,5 м [4, с. 531], принятое с учетом прочности применявшегося в то время природного камня и размеров сечения ступеней.

В случаях, когда требовались более широкие марши, в тот же исторический период применялись каменные лестницы с опиранием на спаренные металлические полосы вдоль края марша. Такие



Рис. 1. Сохранившаяся до наших дней древняя прямая висячая каменная лестница в замке Каср-аль-Азрак, Иордания (датирована не позднее 13 в.), (автор: Ж. Хусен, 2010; по материалам сайта Wikipedia.org; лицензия GNU FDL; постоянная ссылка: https://en.wikipedia.org/wiki/File:20100922_qasralazrak33.JPG)

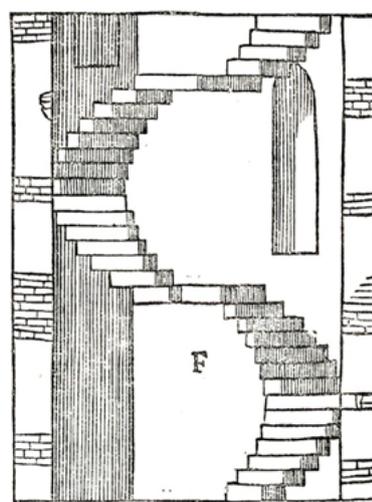


Рис. 2. Разрез овальной лестницы из труда А. Палладио «Четыре книги об архитектуре» (Венеция, 1570 г.), где описаны решения бескосурных каменных лестниц [3]



Рис. 3. Лестница павильона «Шапель», возведенная по проекту А. А. Менеласа, Царское село (автор: Михаил М., 2018; по материалам сайта Citywalls.ru; постоянная ссылка: <https://www.citywalls.ru/photo360959.html>)



Рис. 4. Спиральная лестница в одной из звонниц Исаакиевского собора, возведенная по проекту О. Монферрана (автор: К. Олейникова, 2020; фото предоставлено для использования в данной статье)



Рис. 5. Парадная лестница особняка П. П. Дервиза, возведенная по проекту арх. А. Ф. Красовского в 1898 г., Английская наб., д. 28 (автор: Shuba, по материалам сайта Citywalls.ru; постоянная ссылка: <https://www.citywalls.ru/photo669794.html>)



Рис. 6. Парадная лестница доходного дома Елисеевых, возведенная по проекту арх. Г. В. Барановского в 1892–1894 гг., Биржевая линия В. О., д. 14 (автор: Shuba, по материалам сайта Citywalls.ru; постоянная ссылка: <https://www.citywalls.ru/photo187494.html>)

элементы уже именовались косоурами и фактически выполняли их функцию, несмотря на то, что работают они иначе, чем принятые в современном строительстве двутавры и швеллеры.

В отличие от парадных лестниц, где ступени обычно обтесывались снизу, черные лестницы снизу часто оставались необработанными в целях

удешевления и с расчетом на лучшее сцепление при последующем оштукатуривании. В некоторых случаях под маршем устраивался деревянный подшив, который далее оштукатуривался по дранке. Иногда для удешевления строительства проступи и подступенки известняковых ступеней дополнительно облицовывались мраморными



Рис. 7. Черная лестница в звоннице Морского Никольского Собора в Кронштадте. Частичное обрушение штукатурного слоя снизу марша (фото выполнено авторами, 2009)



Рис. 8. Лестница в жилом доме 1916 г. постройки, Приморский пр., д. 6. Частичное обрушение штукатурного слоя снизу марша (автор: Ю. Удалов, 2025; фото предоставлено для использования в данной статье)

плитами, установленными на алебастр [5, с. 405; 6, с. 524].

Заделка ступеней в стену осуществлялась уже после возведения стен [4, с. 532].

Для изготовления ступеней наиболее массово в дореволюционном строительстве Петербурга использовался плотный известняк ближайших месторождений: путиловский (каменоломни близ сел Антоново [7, с. 39], Путилово, Воловищево, Никольщина, Петровщина, Дальняя Борова, Близкая Борова, Крутой ручей [8, с. 43]), волховский (каменоломни Победище и Рокольское [7, с. 40]), тосненский (каменоломни близ села Никольское [7, с. 40]), гатчинский (Ново-деревенская каменоломня, а также каменоломни близ деревень Ротковая, Пудость, Парицы, Черницы [7, с. 40–42]).

Данные известняки залегают пластами, неодинаковыми по своим физико-механическим свойствам. Пласты путиловского, волховского и тосненского известняка получили индивидуальные названия. Информация об этих названиях и сфере применения конкретных пластов в литературе различна [7, с. 39; 8, с. 44; 9, с. 21–22]. Можно перечислить следующие пласты путиловского

известняка, которые использовались для изготовления ступеней: буток [8, 9], братеник (слой самого высокого качества) [8, 9], переплет [7–9], мягонький [9], наджелтый [7, 9], желтый [7–9], старичский [8], новый [9].

В. П. Стаценко [5, с. 405; 6, с. 524] указывает, что для ступеней наиболее подходящим материалом считались путиловская и волховская плиты хороших пластов (зеленовато-серого цвета без прослоек и каверн), а лучшим — ревельский мраморовидный известняк.

Готовые ступени именовались «ступенной плитой» и имели стандартные габариты (табл. 1).

При производстве работ по возведению висячих каменных лестниц особое внимание уделялось так называемой притеске (т. е. геометрии стыка) смежных ступеней, определявшей способность марша работать как единое целое. В. П. Стаценко [6, с. 536] приводит три варианта притески (рис. 9), Урочного положения [10, с. 354] — только один (рис. 10).

Несмотря на ответственность данного стыка, в практике обследований порой встречается полное отсутствие притески ступеней друг к другу вплоть до наличия зазора между каменными эле-

Таблица 1. Ходовые габариты каменных известняковых ступеней в Петербурге [10, с. 19].

Ширина (т. е. размер проступи), вершки (мм)	Толщина (т. е. размер подступенка), вершки (мм)	Длина (т. е. ширина марша с заделкой), аршины (мм)
8 (356), 9 (401)	2½ (112), 3½ (156)	1½ (1067), 1¾ (1245), 2 (1423), 2¼ (1601), 2½ (1778), 2¾ (1956)
8 (356) ... 10 (445)	3¼ (145) ... 3½ (156)	2 (1423), 2¼ (1601), 2½ (1778), 3 (2134), 3¼ (2312), 3½ (2490), 3¾ (2667), 4 (2845)

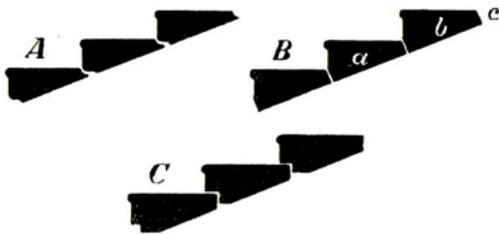


Рис. 9. Типы притески ступеней по В. П. Стаценко [6, с. 536]

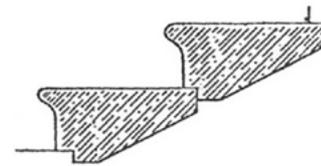


Рис. 10. Притеска ступеней по Урочному положению [10, с. 354]

ментами, заполненного впоследствии цементным раствором.

Возведение висячих каменных лестниц, кроме вышеприведенных ограничений по несущей способности, имело ряд других существенных недостатков [5, с. 416; 6, с. 537]:

1. Необходимость заделки всех ступеней в стену на некоторую глубину создавала *препятствие для пропуска вертикальных инженерных коммуникаций* в стене вдоль марша. Рекомендуемые значения варьировались от источника к источнику и составляли:

- 7–8 дюймов (178–204 мм) [10, с. 352];
- 3–6 вершков (134–267 мм) [4, с. 531; 5, с. 415; 11, с. 25];
- 120–130 мм (при маршах шириной не более 1,2 м) и 250 мм (при маршах шириной от 1,2 до 2,0 м) [4, с. 532].

2. Ответственность ступеней в висячих лестницах обуславливала *необходимость тщательного контроля качества* используемого природного камня. К поставляемым на стройку изделиям предъявлялись повышенные требования, что удорожало стоимость строительства. Строгий контроль качества включал в себя:

– заказ лучших сортов камня без каверн, поперечных и продольных трещин, а также глинистых прослоек [5, с. 406; 6, с. 525; 10, с. 352; 11, с. 21];

– дополнительный входной контроль на площадке [5, с. 406; 6, с. 525; 11, с. 21], так как поставщики камня довольно часто халатно относились к контролю качества на каменоломнях, в том числе добывая камень зимой или поздней осенью во время морозов [8, с. 94];

– тщательную подгонку и обтеску элементов [5, с. 415; 6, с. 537; 10, с. 352; 11, с. 21];

– аккуратную заделку элементов в стену [10, с. 352] на «жирном» цементном растворе [5, с. 415; 6, с. 537; 11, с. 21] с тщательной расщебенкой всех пустот [11, с. 21].

3. Для плотного известняка характерно *хрупкое разрушение*. В случае выхода из строя одной или двух ступеней (особенно при отсутствии надежной притески), при резком ударе или пожаре случалось лавинообразное обрушение всего марша [5, с. 416; 6, с. 537; 10, с. 352].

Развернутое описание бескомпромиссных висячих каменных лестниц в отечественных источниках встречается вплоть до начала 1930-х гг. [6, с. 536].

К середине 1930-х гг. применение природного камня для изготовления ступеней перестало считаться целесообразным [12, с. 635; 13, с. 378]. В этот период конструктивное решение бескосурных лестниц воспринималось выгодным в первую очередь с точки зрения экономии стали, однако в качестве материала для ступеней рекомендовалось использовать уже сборный железобетон [12, с. 626–627]. Отметим, что использование сборного железобетона для этих нужд упоминалось еще в начале XX в. у В. Г. Залесского [4, с. 532].

Задачи отрасли в удешевлении и унификации строительства, вкупе с расширением использования различных бетонов, обусловили с 1930-х гг. концентрацию научного внимания в области каменных и армокаменных конструкций на кладке стен. В этой связи невозможно не упомянуть вклад созданной в 1930 г. в Москве лаборатории каменных конструкций ЦНИПС (ныне ЦНИИСК), где под руководством Л. И. Онищика была разработана основа действующих до сегодняшнего дня норм [14; 15, с. 11–12; 16]. Природный камень как материал для кладки стен продолжал активно применяться в южных республиках СССР: Азербайджане, Армении, Молдавии, Украине, Узбекистане [17].

Исследования же работы иных типов конструкций, в том числе висячих каменных лестниц к этому моменту перестали быть актуальными. Возобновление интереса к ним созрело только к началу XXI в., когда из-за физического износа регулярно стала возникать необходимость их ремонта.

Методы расчета

Известно, что оценка несущей способности существующей строительной конструкции может быть выполнена двумя способами: расчетным и эмпирическим.

Для строительных конструкций, материал которых характеризуется хрупким разрушением,

натурные испытания могут привести к необратимым изменениям и, следовательно, к утрате подлинных исторических элементов. Для висячих каменных лестниц такие испытания несут в себе повышенные риски с реставрационной точки зрения. Восстановление разрушенного элемента может оказаться невыполнимой задачей как для проектирования и согласования, так и для непосредственного производства работ по возведению аналогичной конструкции.

Расчетное обоснование несущей способности и применение неразрушающих методов определения физико-механических свойств материалов в соответствии с ГОСТ Р 55567—2013 [18, п. 4.4] для подобных исторических конструкций всегда является предпочтительным.

В довольно ранних отечественных источниках середины XIX в. уже отражены соображения по расчету висячих каменных лестниц [19, с. 403]. Несмотря на то, что опирание ступеней друг на друга создавало кручение, определяющим фактором считался изгиб. Это допущение приводится в литературе на всем протяжении периода возведения подобных конструкций в массовом строительстве [4, с. 533; 19, с. 403; 20, с. 317; 21, с. 433].

В те годы расчет велся по допускаемым напряжениям и наиболее подробно описан в пособии В. Г. Залесского [4, с. 533]. Вертикальная нагрузка на ступень раскладывалась на две силы, направленные продольно и поперечно по направлению к наклонной линии марша (рис. 11). Несмотря на то, что наклонная притеска ступеней считалась наименее надежным способом стыковки [5, с. 415; 6, с. 537], в расчете она частично учитывалась: предполагалось, что изгиб происходит исключительно в поперечном направлении, в то время как продольное усилие передается на нижележащую ступень [4, с. 533]. Дальнейших расчетных проверок (кроме проверки отдельной ступени), учитывающих совместную работу всего марша, не проводилось.

В. Г. Залесский открыто констатировал несовершенство данной методики [4, с. 533]. Вместе с тем профессионалы понимали существование эффекта совместной работы ступеней в марше. В. Г. Залесский приводит рекомендацию по устройству стрелы подъема при укладке ступеней (фактически превращая марш в ползучий свод). Уточное положение обращает внимание на критическую важность надежного опирания нижней фризовой ступени, без которого впоследствии может произойти лавинообразный отказ всего марша [10, с. 352].

Необходимо отметить, что распространенная в современной инженерной практике парадигма о том, что природный и искусственный камень на растяжение практически не работают, является существенным упрощением. *В каменных висячих лестницах ступени в общем случае работают на изгиб с кручением.* Такие типы напряженно-деформированного состояния природных камней в настоящее время изучает геомеханика [22, 23].

Расчеты каменных конструкций по допустимым напряжением были общепринятыми в России и СССР до 1943 г. [15, с. 15]. Допускаемые напряжения назначались на основании испытаний при одноосном напряженном состоянии (например, при осевом сжатии). Установленные при этом допускаемые напряжения применялись также для расчета конструкций, работающих в более сложных условиях, например при внецентренном сжатии. Зависимость между напряжениями и деформациями принималась прямолинейной, по закону Гука, и в соответствии с этим для расчета применялись формулы сопротивления материалов, выведенные для идеально упругого тела.

Для природного камня допускаемые напряжения (т. е. его расчетное сопротивление) определялись умножением временного сопротивления материала на понижающие коэффициенты, которые довольно сильно варьировались от автора к автору:

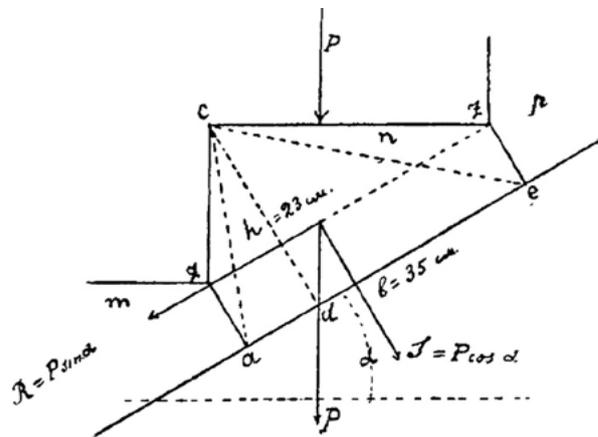


Рис. 11. Схема разложения вертикальной нагрузки по В. Г. Залесскому [4, с. 533]

– В. Г. Залесский рекомендовал использовать на изгиб — 1/6 (для висячих каменных лестниц), 1/10 (в остальных случаях) [4, с. 534];

– Н. К. Лахтин — на сжатие — от 1/20 до 1/30 (для сводов) [24, с. 24];

– Н. А. Белелюбский — на сжатие — 1/30 [25, с. 182];

– И. Г. Малюга — на сжатие — от 1/20 до 1/40 (для частей сооружений, подвергающихся «сотрясению») и, только в особо благоприятных случаях, — 1/10 [25, с. 182].

Более последовательно описывает данные коэффициенты М. П. Субботин с ссылкой к исследованиям И. Баушингера (табл. 2) [26, с. 112].

С 1943 г. для каменных конструкций стал применяться метод расчета по разрушающим нагрузкам, отраженный в «Указаниях по проектированию каменных конструкций в условиях военного времени» [15, с. 15]. В данном методе разрушающие нагрузки определялись по экспериментально-теоретическим формулам, а допускаемые нагрузки — делением разрушающих нагрузок на коэффициент запаса.

С 1955 г. основным методом расчета стал расчет по предельным состояниям, реализованный впервые в нормах НиТУ-120-55 [15, с. 15]. Особенностью данного метода является: учет трех возможных расчетных предельных состояний (по

Таблица 2. Коэффициенты перехода от предела прочности к допускаемым напряжениям по М. П. Субботину [26, с. 112]

Условия работы элемента / Прочностная характеристика	Сопротивление сжатию		Сопротивление разрыву		Сопротивление скалыванию		Сопротивление изгибу	
	Временное	Расчетное	Временное	Расчетное	Временное	Расчетное	Временное	Расчетное
В большинстве случаев	1*	1/20	1/30	1/300	1/14	1/140	1/6	1/60
Самые благоприятные условия	1*	1/10						
Высокие колонны, подвергающиеся сотрясению	1*	1/40						

* За единицу принято временное сопротивление сжатию природного камня.

Таблица 3. Классификация известняка по прочности, применявшаяся до середины XX в.

Наименование камня	Классификация	Временное сопротивление сжатию
Известняки (мраморы, доломиты, плотные известняки, раковинистые известняки и т. п.)	I качества	1000 кг/см ² (98,1 МПа)
	II качества	800 кг/см ² (78,4 МПа)
	III качества	500 кг/см ² (49,0 МПа)

несущей способности, по величине предельных деформаций и по величине предельного раскрытия трещин) и применение вместо коэффициента запаса различных расчетных коэффициентов.

Фактически эволюция отечественной нормативной базы была обусловлена стремлением к оптимизации новых конструкций, так как использование коэффициентов, по типу приведенных в табл. 2, часто вело к тому, что запас оказывался непомерно большим, а элементы — громоздкими и неэкономичными [15, с. 17]. При использовании коэффициентов из табл. 2 ступени каменных висячих лестниц часто оказывались перегруженными. В. Г. Залесский в своем примере сравнивал полученные напряжения не с расчетным значением, а с временным. Коэффициент запаса (т. е. величина, обратная коэффициентам из табл. 2), в его примере составляет не 10, а чуть более 4 [4, с. 534].

До 1930-х гг. в Советском Союзе активно опирались на немецкие нормы (табл. 3) и научные данные. В 1930-е гг. советскими учеными были

проведены значительные исследования по оптимизации консервативных коэффициентов запаса в каменных конструкциях. А. М. Розенблюмас приводит сравнение действовавших на тот момент немецких норм с полученными результатами [15, с. 12]. В немецких нормах для кирпича прочностью 15,0 МПа допускаемые напряжения составляли 1,4 МПа, что эквивалентно коэффициенту запаса около 11, в то время как значение по результатам советских исследований составило, в зависимости от качества раствора, от 3 до 1,5. Предпосылки полученного коэффициента запаса $k = 3$ на прочность при сжатии, растяжении и изгибе описаны Л. И. Онищиком [14, с. 24–27].

В современных исследованиях Ф. Литтла [27], о которых будет сказано далее, также применяется метод расчета по допускаемым напряжениям и указано, что в большинстве случаев, если поверочный расчет показывает коэффициент запаса 3 и более, то натурные испытания марша не требуются (т. е. марш способен воспринимать действующие нагрузки). При этом ступени должны обладать однородностью (в них не должно быть существенных дефектов).

Учитывая то, что в общем случае, по сравнению с методом расчета по предельным состояниям, метод расчета по допускаемым напряжениям является более консервативным, а также опираясь на вышеприведенный опыт отечественных и зарубежных исследований, в поверочных расчетах, в условиях отсутствия современной норматив-

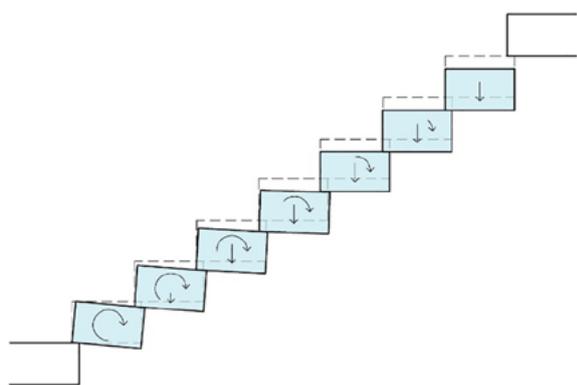


Рис. 12. Плоские ступени по С. Прайс и Х. Роджерс [2]. Картина усилий и деформаций

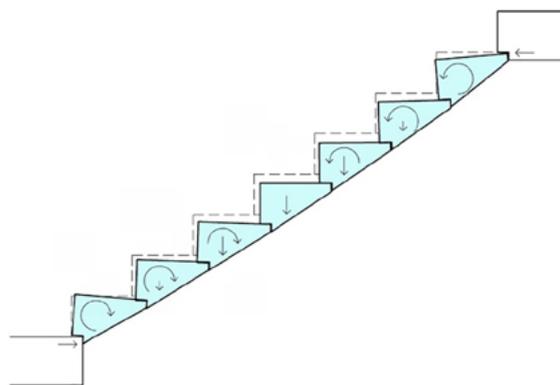


Рис. 13. Припазованные ступени по С. Прайс и Х. Роджерс [2]. Картина усилий и деформаций

ной базы, разумно использовать метод расчета по допускаемым напряжениям и устанавливать минимальный коэффициент запаса $k = 3$.

Необходимо отметить, что во второй половине XX в. в рамках геомеханики проводились дальнейшие исследования по уточнению соотношения прочности природного камня на сжатие к прочности на растяжение [22, с. 94]. Полученные значения являются менее консервативными, чем приведенные в табл. 2, поэтому в практической инженерной работе для расчетного определения прочности на растяжение при известной прочности на сжатие рекомендуется использовать коэффициенты из табл. 2.

При заданных прочности на сжатие и прочности на растяжение определение предельного касательного напряжения (в ступени оно возникает от перерезывающей силы и крутящего момента), в настоящее время может выполняться расчетно. Для этого производится построение паспорта прочности в соответствии с приложением 2 ГОСТ 21153.8—88 [28].

К началу XXI в., как указывалось ранее, в мировой практике возникла потребность обновления имеющегося арсенала расчетных методов в отношении висячих каменных лестниц. Исследователи снова стали пытаться ответить на главный вопрос: работают ли ступени отдельно или

совместно, и если они работают совместно, то как именно [29, 30]?

Начиная с 1990-х гг. стали публиковаться статьи, в которых делались попытки аналитической оценки перераспределения усилий в маршах висячих лестниц.

Дж. Хейман [31] использовал базовые формулы сопротивления материалов с учетом кручения и нарастания усилий в марше сверху вниз, однако не рассматривал разные варианты стыков ступеней. В его работе отмечено, что изгибающий момент воспринимается каждой ступенью индивидуально, в то время как крутящий момент вдоль марша нарастает. То есть в работе ступени определяющим является не изгиб, а кручение.

С. Прайс и Х. Роджерс [2], кроме обзора опыта обследования подобных лестниц, обозначили два принципиальных конструктивных решения ступеней по типу стыка (притески): плоские (plane treads) (рис. 12) и припазованные (rebated treads) (рис. 13). В данном исследовании указывалось, что при наличии надежной припазовки напряжения от кручения резко падают из-за перераспределения усилий вдоль марша как вверх, так и вниз. Формулы для расчета были приведены только для плоских ступеней, но содержали математический аппарат для учета трещин.

Ф. Литтл [27] привел формулы для расчета не только плоских, но и припазованных ступеней. Кроме того, в его исследовании приведены расчеты по деформациям.

Д. О'Дуайер [32] разработал методику вероятностного отказа таких лестниц.

Е. А. У. Маундер [30] проанализировал влияние арочного эффекта на работу конструкции.

И. Сайтос [33] разработал автоматизированную аналитическую модель для припазованных прямых маршей.

М. Ангелилло [34] сконцентрировал свое внимание на аналитических формулах для спиральных лестниц.

Помимо уточнения аналитических методов, в 2010-х гг. получили распространение методы численного моделирования [35, 36]. Наиболее перспективным для научных исследований каменных и армокаменных конструкций в целом и висячих каменных лестниц в частности в настоящее время считается метод дискретных элементов (МДЭ), изначально разработанный для моделирования сыпучих тел. При использовании данного машинного метода габариты конечных элементов модели задаются в соответствии с фактическими габаритами отдельных камней кладки. Взаимодействие между конечными элементами имитирует реальное физическое взаимодействие камней кладки с учетом физико-механических свойств раствора или с учетом его отсутствия. Имеется отечественный опыт подобных исследований иных каменных конструкций [37].

Для висячих каменных лестниц Б. Риго [35] выполнил сравнение вышеприведенных упрощенных аналитических методов с результатами расчетов при помощи МДЭ. Полученные результаты показали, что аналитические методы дают консервативные результаты на прямых маршах, а на спиральных занижают крутящие моменты.

Тем не менее ввиду сложности применения МДЭ в инженерной практике *на реальных объек-*

тах наиболее разумно применять аналитические методы: для прямых маршей — формул Ф. Литтла [27], для спиральных — формул М. Ангелилло [34].

В настоящее время приходится констатировать, что эффект от совместной работы ступеней в решающей степени зависит от типа и качества стыка между ступенями (мест притески). С. Прайс и Х. Роджерс приводят перечень факторов, которые необходимо учитывать при выполнении поверочного расчета существующих висячих каменных лестниц [2]:

- прочность камня лестницы;
- состояние материалов поддерживающей стены;
- состояние раствора между ступенями;
- метод возведения лестницы: ступень за ступенью или весь марш по кружалам;
- наличие вертикального и горизонтального опирания внизу и вверху марша;
- тип стыковки к площадкам;
- прочность и жесткость ограждения.

Физико-механические свойства камня

Базовым условием для осуществления корректного поверочного расчета, кроме наличия математического аппарата, является задание адекватных физико-механических свойств камня.

Отечественные научные исследования в области свойств природных камней ведутся непрерывно с XIX в.

До революции вопросами ресурсов и свойств строительного камня вообще и облицовочного в особенности занимались лаборатории Н. А. Белелюбского в Петербургском институте инженеров путей сообщения, Н. М. Абрамова — в Новочеркасске, К. К. Симинского — в Киеве.

В начале Первой мировой войны Российская академия наук создала Комиссию по изучению естественных производительных сил России (КЕПС), в задачу которой входило и изучение каменных материалов. Комиссия работала под руководством

академики А. Е. Ферсмана, Ф. Ю. Левинсона-Лессинга, Д. С. Белянкина. После революции комиссия продолжила работу и опубликовала ряд выпусков трудов КЕПС [38, 39] по каменным материалам. Комиссия освещала ресурсы каменных строительных материалов, устанавливала методы оценки их качества и изучала поведение камня в постройках. Значительное внимание обращалось на разработку методов полевого и лабораторного изучения камня как в каменоломнях, так и в сооружениях и памятниках.

В 1930 г. Отдел каменных материалов КЕПС перешел в состав Петрографического института АН СССР, которая, в свою очередь, была переведена в Москву в 1934–1935 гг. Здесь была развернута большая современная лаборатория строительных материалов, оборудование которой позволяло проводить весь необходимый цикл испытаний камня как облицовочного материала. Экспедиционные работы заметно расширились. Районами исследований стали Южная Осетия, Абхазия, Армения, Кузнецкий бассейн, Алтай, Карелия, Камчатка и др. Продолжались работы по испытанию камней в лабораториях в Москве, Ленинграде, Киеве, Новочеркасске, Иркутске, Ташкенте, Тбилиси.

После Великой Отечественной войны необходимость удешевления строительства в целом негативно сказалась на объемах применения штучного естественного камня и состоянии добывающей его промышленности. Новые карьеры за это время не открывались, а многие старые оказались исчерпанными. Кроме того, часть карьеров, дававших ранее штучный камень, была переведена на добычу щебня и бута с широким применением взрывчатых веществ, из-за чего получить крупноблочный штучный камень там стало невозможно. К 1970-м гг. оказались утерянными старые кадры камнеобработчиков, а оборудование на фабриках и заводах устарело как морально, так и физически [40, с. 8].

Исследованиями свойств известняка в Ленинграде с конца 1980-х гг. занимались профессор кафедры минералогии СПбГУ А. Г. Буллах, сотрудники АО «Институт по реставрации памятников истории и культуры “Спецпроектреставрация”» Л. С. Харьюзов, А. И. Савченко [9].

Для вновь возводимых конструкций параметры ступеней из природного камня в настоящее время регламентируются следующими документами:

- физико-механические характеристики — ГОСТ 9479—2011 [41];
- геометрические характеристики — ГОСТ 23342—2012 [42];
- дополнительные требования при реставрации — ГОСТ Р 59437—2021 [43].

По ГОСТ 9479—2011 минимальная прочность плотного известняка при сжатии (временное сопротивление сжатию в сухом виде) для изготовления ступеней составляет 25 МПа.

Для существующих конструкций имеются методы как *лабораторного (разрушающего)*, так и *полевого (неразрушающего)* определения физико-механических свойств.

К первой группе относятся методы определения предела прочности при сжатии по ГОСТ 21153.2—84 [44], ГОСТ 30629—2011 [45], растяжении по ГОСТ 21153.3—85 [46], изгибе по ГОСТ 21153.6—75 [47], ГОСТ 30629—2011 [45]. Данные методы — наиболее точные, но, как упоминалось ранее, являются разрушающими, поэтому должны применяться ограниченно.

В качестве полевых возможно применение сейсмоакустических и ультразвуковых методов [48, с. 61; 49; 50; 51].

Для предварительных поверочных расчетов, в случае, если удастся достоверно атрибутировать тип использованного природного камня, *допустимо использование результатов испытаний, проведенных для данного типа камня ранее* (табл. 4).

В дореволюционной практике плотный известняк для строительных конструкций делился на

Таблица 4. Показатели прочности известняка на сжатие по результатам испытаний

Наименование камня	Временное сопротивление сжатию	Источник
Источники до середины XX в.		
Гатчинский известняк	118 пуд/кв. дюйм (29,4 МПа)	[10, с. 19]
Гатчинский известняк (Черницкая каменоломня)	398 пуд/кв. дюйм (99,1 МПа)	[7, с. 41]
Путиловский известняк	937 кгс/см ² (91,9 МПа)	[8, с. 45, 66]* [26, с. 89]*
Волховский известняк	1068 кгс/см ² (104,7 МПа)	
Тосненский известняк	900 кгс/см ² (88,2 МПа)	
Современные источники		
Путиловская плита (карьер Путилово)	30–200 МПа	[9, с. 29]
Тосненская плита (гертовские ломки, пласты «белый», «серый», «желтый»)	220 МПа	
Волховская плита (обуховские ломки)	30–160 МПа	
Путиловский известняк	до 129 МПа	[52]
Волховский известняк (Сельцо Бабино)	30–100 МПа	
Гатчинские доломиты (Елизаветинское, Врудское, Парицкое, Каменные Борницы (Борисовское))	90–170 МПа	

* По результатам испытаний механической лаборатории Петербургского института инженеров путей сообщения для постройки Троицкого моста в Санкт-Петербурге.

Примечания:

1. Для перехода от временного сопротивления сжатию из табл. 4 к другим характеристикам см. табл. 2 настоящей статьи и приложение 2 ГОСТ 21153.8—88 [28].

2. При назначении прочностных характеристик камня ступеней необходимо учитывать, что источники приводят спектр прочностных характеристик в большом диапазоне, в то время как камень для ступеней бескососурных висячих лестниц при постройке отбирался наилучшего качества.

3 сорта с применением градации немецкой комиссии Баушингера, Функа и Хартига (табл. 3) [4, с. 534; 8, с. 64; 23, с. 184].

Основной испытательной лабораторией поставляемого камня для строительства, как упоминалось ранее, являлась лаборатория Института инженеров путей сообщения. К сожалению, результаты испытаний известняка в этой лаборатории опубликованы не были [39], но часть из них попала в пособия Н. Н. Лямина [8, с. 45, 66] и М. П. Субботина [26, с. 89].

Результаты более поздних испытаний физико-механических свойств природных камней для ступеней приведены в источниках последних десятилетий [9, с. 29; 52].

Данные по прочности плотных известняков, указанные у Л. И. Онищика [14, с. 18], для расчетов петербургских лестниц малоприменимы,

так как отсылают к зарубежным испытаниям и не содержат информации о месторождении камня.

Характерные дефекты

Опыт обследования висячих каменных лестниц в Санкт-Петербурге показывает, что большинство из них успешно эксплуатируется на длительном временном промежутке (на текущий момент подавляющее большинство сохранившихся образцов имеет возраст более 100 лет).

К типовым дефектам, не относящимся к механической безопасности, можно отнести потерю адгезии штукатурки к камню ступеней снизу с последующим ее обрушением (рис. 7, 8). Проведенные исследования деформаций показывает очень небольшие теоретические значения вертикальных перемещений ступеней под эксплуатационной нагрузкой [27, 35], поэтому данный тип дефекта с большей



Рис. 14. Излом двух нижних ступеней марша от локальной перегрузки в Здании театрального декорационного зала и экипажного заведения, Б. Подъяческая, д. 20:
а — трещины в растянутой зоне, истирание и сколы ступеней;
б — расстыковка ступеней, ступени плоские, без припазовки
 (автор: А. Гончаровский, 2021; фото предоставлено для использования в данной статье)



Рис. 15. Лестница в звоннице Морского Никольского собора в Кронштадте до реставрации. Обрушение маршей (фото выполнено авторами, 2009)



Рис. 16. Обрушение известняковых ступеней при пожаре. Лестница по косоурам постройки 1850-х гг. в Санкт-Петербурге (фото выполнено авторами, 2022)

вероятностью обусловлен дефектами штукатурки (нарушением технологии нанесения, температурно-влажностного режима, неправильно выбранным раствором или слишком большим слоем намета), нежели чем подвижностью ступеней.

К типовым дефектам, свидетельствующим о повышении рисков в отношении механической безопасности, относятся поперечные трещины в месте заделки ступеней в стены и их расстыковка (рис. 14). В таких случаях ступени могут фактически повиснуть на ограждении. Основ-

ной причиной данных дефектов являются резкие локальные перегрузки при эксплуатации (падение тяжелых предметов). При обнаружении подобных дефектов даже в одной ступени весь марш надлежит признать аварийным из-за опасности лавинообразного обрушения. Далее необходимо провести комплекс противоаварийных работ с последующим восстановлением марша. Случаи обрушения марша целиком фиксируются как при нарушении режима эксплуатации, так и при пожарах (рис. 15, 16).

К сожалению, авторам неизвестны случаи восстановления висячих каменных лестниц после обрушения маршей без введения новых косоуров. При этом изменяется оригинальная схема работы конструкций лестницы, теряется первоначальный архитектурный облик. *При принятии проектных решений по восстановлению марша необходимо учитывать более чем вековой опыт успешной эксплуатации большинства подобных лестниц без применения каких-либо косоуров.* Действующий ГОСТ Р 59437—2021 требует, чтобы внедрение новых стальных элементов было обосновано [43, п. 5.8].

При восстановлении ступеней необходимо применять природный камень, добытый по возможности из того же месторождения. В случае отсутствия такой возможности требуется подобрать камень, наиболее близкий к воссоздаваемому по внешнему виду и физико-механическим свойствам [43, п. 4.11].

При проектировании приспособления или реконструкции здания необходимо стремиться к сохранению функции существующей лестницы, что, при отсутствии вышеупомянутых опасных механических дефектов ступеней, будет являться основанием для ее сохранения.

Заключение

Бескосоурные висячие каменные лестницы являются уникальными объектами строительного искусства прошлого и требуют от инженера бережного и вдумчивого отношения.

Визуальные обследования технического состояния рассматриваемого типа лестниц необходимо вести с фокусом на вышеприведенные характерные дефекты. Для точного атрибутирования вида камня целесообразно привлечение специалистов в области петрографии.

Инструментальное обследование необходимо вести преимущественно неразрушающими методами. Подобные работы эффективно

осуществлять совместно со специалистами в области геофизики. Использование неразрушающих средств измерения, широко распространенных в строительстве (ультразвуковые дефектоскопы и склерометры) для определения прочности материала ступеней требуют отдельного изучения.

Приведенные выше методы расчета могут быть использованы как при обследовании технического состояния, так и при проектировании.

По нашей оценке, применение бескосоурных конструктивных решений лестниц при восстановлении дефектных маршей и отдельных ступеней является возможным. При этом в процессе проектирования необходимо тщательно подойти к разработке всего цикла повторного возведения марша, включая технологию производства работ.

Список источников

1. Плужников А. В. Термины российского архитектурного наследия / А. В. Плужников. — М.: Искусство, 1995. — 160 с.
2. Price S. Stone cantilevered staircases / S. Price, H. Rogers // IStructE — The Structural Engineer. — January 2005. — Iss. 83(2). — Pp. 29–36.
3. Палладио А. Четыре книги об архитектуре. В коиx, после краткого трактата о пяти ордерах и наставлений наиболее необходимых для строительства, трактуются о частных домах, дорогах, мостах, площадях, кситах и храмах / А. Палладио; пер. И. В. Жолтовского // Первая книга об архитектуре Андреа Палладио, 2-е стереотипное изд. — М.: Изд-во Всесоюзной академии архитектуры, 1938. — С. 74.
4. Залесский В. Г. Архитектура. Краткий курс построения частей зданий, читанный в Императорском московском техническом училище адъюнкт-профессором В. Г. Залесским, с дополнением популярного изложения способов поверочного расчета и определения размеров конструкций / В. Г. Залесский. — М.: Типо-литография Т-ва И. Н. Кушнерев и Ко, 1904. — 582 с.

5. Стаценко В. П. Части зданий. (Гражданская архитектура). — Изд. 4-е, испр. и доп. — СПб.: Типография Штаба Отд. Корп. погр. стражи, 1912. — 516 с.
6. Стаценко В. П. Части зданий. Гражданская архитектура. — Изд. 7-е (2-е посм.), доп. и испр. / В. П. Стаценко. — М.-Л.: Государственное издательство, 1930. — 656 с.
7. Радивановский В. И. Строительные материалы / В. И. Радивановский. — Вып. 1. Естественные камни. — СПб.: Типография А. С. Суворина, 1890. — 64 с.
8. Лямин Н. Н. Естественные каменные строительные материалы / Н. Н. Лямин. — Вып. I. — СПб.: Типография П. П. Сойкина, 1911. — 74 с.
9. Харьюзов Л. С. Путиловский камень (плитчатый известняк) как объект реставрации в памятниках архитектуры: учеб. пособие / Л. С. Харьюзов, А. Г. Булах, А. И. Савченко; науч. ред. А. Г. Булах. — СПб.: Изд. С.-Петерб. ун-та, 2012. — 52 с.
10. Иллюстрированное Урочное положение. Полный текст по исправленному экземпляру с пояснительными рисунками, справочными сведениями, расчетами, практическими указаниями и банковскими расценками на строительные работы. Пособие при составлении смет, проектировании и исполнении работ. Около 800 рис. в тексте / Сост. Н. И. де-Рошефор. — Изд. 6-е, испр. — Петроград: Склад издания у К. Л. Риккера, 1916. — 694 с.
11. Федоров П. А. Лестницы каменные, металлические и деревянные. Практическое руководство по постройке различных лестниц для строителей, техников, домовладельцев, десятников и т. п. С 49 рис. — Изд. 2-е, значительно доп. — СПб.: Книгоиздательство А. Ф. Сухова, 1912. — 38 с.
12. Строительная индустрия. Справочное руководство по гражданскому и промышленному строительству. В 16 томах / Год общ. ред.: В. И. Вельман (гл. ред.) [и др.]. — Т. VII. Части зданий. Ч. 2 / Под ред. инж. Н. С. Дюрнбаум, при участии инж. Л. И. Онищика. — М.-Л.: Госстройиздат, 1933. — 663 с.
13. Серк Л. А. Курс архитектуры. Гражданские и промышленные здания. Т. 1. Конструктивные схемы и элементы гражданского строительства / Л. А. Серк. — М.-Л.: Госстройиздат, 1938. — 440 с.
14. Онищик Л. И. Каменные конструкции промышленных и гражданских зданий / Л. И. Онищик. — М.-Л.: Стройиздат, 1939. — 308 с.
15. Розенблюмас А. М. Каменные конструкции / А. М. Розенблюмас. — М.: Высшая школа, 1964. — 302 с.
16. СП 15.13330.2020 «СНиП II-22-81* Каменные и армокаменные конструкции». — М.: Минстрой России, 2020.
17. Поляков С. В. Каменная кладка из пильных известняков / С. В. Поляков, Ю. В. Измайлов, В. И. Коноводченко, Ф. М. Оруджев и др. — Кишинев: Картя Молдовеняскэ, 1973. — 344 с.
18. ГОСТ Р 55567—2013. Порядок организации и ведения инженерно-технических исследований на объектах культурного наследия. Памятники истории и культуры. Общие требования. — М.: Стандартинформ, 2014.
19. Красовский А. К. Гражданская архитектура. Части зданий / А. К. Красовский // Соч. Аполлинария Красовского. — СПб.: Типография Военно-Учебных Заведений, 1851. — 597 с.
20. Красовский А. К. Гражданская архитектура. Части зданий / А. К. Красовский // Соч. Аполлинария Красовского. — Изд. 2-е. — М.: Типография А. А. Левенсон, 1886. — 443 с.
21. Романович М. Е. Гражданская архитектура. Части зданий. В 4 томах. Т. 2 / Сост. М. Е. Романович. — Изд. 4-е. — СПб.: Типография Евгения Тиле, 1903. — 520 с.
22. Карташов Ю. М. Прочность и деформируемость горных пород / Ю. М. Карташов, Б. В. Матвеев, Г. В. Михеев, А. Б. Фадеев. — М.: Недра, 1979. — 269 с.
23. Каркашадзе Г. Г. Механическое разрушение горных пород.: учеб. пособие для вузов. — М.: Изд-во МГТУ, 2004. — 222 с.
24. Лахтин Н. К. Расчет арок и сводов. Руководство к аналитическому и графическому расчету арочных и сводчатых перекрытий. С 290 черт. в тексте и 8 таблицами / Н. К. Лахтин. — М.: Типо-литография Т-ва И. Н. Кушнерев и Ко, 1911. — 468 с.

25. Мушкетов И. В. Краткий курс петрографии для студентов Института инженеров путей сообщения Императора Александра I / И. В. Мушкетов // Сборник Института инженеров путей сообщения Императора Александра I. Вып. XXX. Труды преподавателей и материалы для институтских курсов. С 112-ю политажами в тексте. — СПб.: Типография Ю. Н. Эрлих, 1895. — 202 с.
26. Субботин М. П. Строительное камневедение: (технология естественных строительных камней): с приложением Геологии строительного камня геолога Л. Е. Наливайко / М. П. Субботин. — Харьков; Киев: Государственное научно-техническое издательство Украины, 1935. — 272 с.
27. Little Ph. Stone cantilever stairs — inspection and analysis of cantilever stairs / Ph. Little, M. Hough, E. Mullarkey // IStructE — The Structural Engineer. — April 2009. — Iss. 87(8). — Pp. 26–33.
28. ГОСТ 21153.8—88. Породы горные. Метод определения предела прочности при объемном сжатии. — М.: Издательство стандартов, 1986.
29. Hume I. Cantilever or hanging stone stairs / I. Hume // IHBC. — Context. — September 1997. — Iss. 55. — Pp. 24–26.
30. Maunder E. A. W. Staircases as cantilevers or arches? — a question for limit analysis / E. A. W. Maunder // SAHC — London: Taylor & Francis Group, 2015. — Pp. 569–575.
31. Heyman J. The mechanics of masonry stairs / J. Heyman // Structural studies of historical buildings. Vol. 2. Dynamics, Repairs and Restoration. — Southampton: Computational Mechanics Publ., 1995. — Pp. 259–265.
32. O'Dwyer D. Assessing the probability of material failure in cantilevered stone stairs / D. O'Dwyer, A. O'Connor, O. Bashorun // Proceedings of the 7th International Probabilistic Workshop. — Delft, 2009. — Pp. 239–249.
33. Sajtos I. Cantilevered staircase: Influence of building technology on the behavior / I. Sajtos // SAHC — Anamnesis, diagnosis, therapy, controls — London: Taylor & Francis Group, 2016. — Pp. 1254–1261.
34. Angelillo M. The Equilibrium of Helical Stairs Made of Monolithic Steps / M. Angelillo // International Journal of Architectural Heritage. November 2015. — Iss. 10(6). — Pp. 675–687. — DOI: 10.1080/15583058.2014.988773.
35. Rigo V. Discrete element analysis of stone cantilever stairs / V. Rigo, K. Bagi // Meccanica. — May 2018. — Iss. 53. — Pp. 1571–1589. — DOI: 10.1007/s11012-017-0739-5.
36. D'Altri M. Structural behavior of stone cantilever stairs: Strain monitoring under controlled loading and numerical modeling / M. D'Altri, Y. Jin, J. Chen, T. Agyarko et al. // Journal of Building Engineering. — 2024. — Iss. 95. — DOI: 10.1016/j.jobbe.2024.110238.
37. Кабанцев О. В. Дискретная модель каменной кладки в условиях двухосного напряженного состояния / О. В. Кабанцев // Вестник ТГАСУ. — 2015. — № 4. — С. 113–134.
38. Дрейер А. И. Разрушение каменных строительных материалов в городских постройках в г. Петрограде / А. И. Дрейер // Материалы для изучения естественных производительных сил России, издаваемые Комиссией при Российской академии наук. Каменные строительные материалы. Сборник 1-й. — Петроград: Гос. учебно-практ. школа-тип. им. тов. Алексева, 1923. — С. 91–105.
39. Белянкин Д. С. Материалы по микроскопическому исследованию гранитов и др. изверженных пород, испытанных в Механической лаборатории Инст. инж. пут. сообщ. в период времени с 1896 по 1912 г. / Д. С. Белянкин // Материалы для изучения естественных производительных сил России, издаваемые Комиссией при Российской академии наук. Каменные строительные материалы. Сборник 1-й. — Петроград: Гос. учебно-практ. школа-тип. им. тов. Алексева, 1923. — С. 106–145.
40. Беликов Б. П. Природные каменные облицовочные материалы (методы их оценки, изучения и ресурсы) / Б. П. Беликов, М. Б. Григорович, В. П. Петров, С. П. Шоблов // Серия «Неметаллические полезные ископаемые». Т. 4. — М.: ВИНТИ, 1975. — 123 с.
41. ГОСТ 9479—2011. Блоки из горных пород для производства облицовочных, архитектурно-строитель-

ных, мемориальных и других изделий. Технические условия (EN 1467:2003, NEQ). — М.: Стандартинформ, 2012.

42. ГОСТ 23342—2012. Изделия архитектурно-строительные из природного камня. Технические условия. — М.: Стандартинформ, 2014.

43. ГОСТ Р 59437—2021. Сохранение памятников каменного зодчества. Общие требования. — М.: Стандартинформ, 2021.

44. ГОСТ 21153.2—84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. — М.: Издательство стандартов, 1984.

45. ГОСТ 30629—2011. Материалы и изделия облицовочные из горных пород. Методы испытаний. — М.: Стандартинформ, 2012.

46. ГОСТ 21153.3—85. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении. — М.: Издательство стандартов, 1986.

47. ГОСТ 21153.6—75. Породы горные. Метод определения предела прочности при изгибе. — М., 1981.

48. Грязнов Т. А. Оценка показателей свойств пород полевыми методами / Т. А. Грязнов. — М.: Недра, 1984. — 197 с.

49. Шибавев И. А. Определение упругих свойств осадочных горных пород на примере образцов известняка с помощью лазерной ультразвуковой диагностики / И. А. Шибавев, В. А. Винников, Г. Д. Степанов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. —

№ 11. — С. 68–75. — DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-125-134.

50. Галуниин А. А. Оценка зависимости динамических модулей упругости от пористости образцов известняка методом импульсной диагностики / А. А. Галуниин, А. А. Гапеев, В. Поспичал // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 4-1. — С. 98–107. — DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_98.

51. Осипов Ю. В. Современные способы определения деформационных свойств горных пород / Ю. В. Осипов, А. Е. Кошелев // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 7. — С. 125–134. — DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-0-68-75.

52. Приложение к приказу Минстроя РФ №1056/пр от 31.07.2017. Сборник № 4. Реставрация и воссоздание конструкций и декора из естественного камня. Приложение 3.

Дата поступления: 05.04.2025

Решение о публикации: 15.05.2025

Контактная информация:

ВЕБЕР Михаил Давидович — ведущий инженер-конструктор; mischaweber@mail.ru

КУЗНЕЦОВ Анатолий Всеволодович — канд. техн. наук, декан факультета «Промышленное и гражданское строительства»; akuznetsov@pgups.ru

On Restoring Cantilever Stone Staircases in the Architecture of St. Petersburg. Part 1

M. D. Veber¹, A. V. Kuznetsov²

¹Inforsproekt LLC, 19, Leninskaya Sloboda str., Moscow, 115280, Russian Federation

²Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Veber M. D., Kuznetsov A. V. On Restoring Cantilever Stone Staircases in the Architecture of St. Petersburg. Part 1. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 509–530. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-509-530

Summary

Purpose: To provide a comprehensive overview of the available tools for structural inspection of cantilever stone staircases. **Materials and methods:** Extensive archival research has been conducted. A thorough analysis and comparison of previously conducted scientific and practical research in this field has been carried out. **Results:** All the necessary information has been collected for the purpose of performing a structural analysis of existing structures. The recommendations have been given considering the experience in design, construction and maintenance of the objects of research. Further research aspects have been formulated. **Practical significance:** The research will provide civil engineers with a tool to facilitate the preservation of valuable historical structures. This is particularly relevant in cases where the restoration and maintenance of the original design is currently complicated.

Keywords: Stone structures, cantilever staircases, hanging staircases, inspection, reconstruction, restoration.

References

1. Pluzhnikov A. V. *Terminy rossiyskogo arkhitekturnogo naslediya* [Terms of Russian architectural heritage]. Moscow: Iskusstvo Publ., 1995, 160 p. (In Russian)
2. Price S., Rogers H. Stone cantilevered staircases. *IStructE — The Structural Engineer*. January 2005, Iss. 83(2), pp. 29–36.
3. Palladio A. *Chetyre knigi ob arkhitekture*. V koikh, posle kratkogo traktata o pyati orderakh i nastavleniy naibolee neobkhodimykh dlya stroitel'stva, traktuetsya o chastnykh domakh, dorogakh, mostakh, ploshchadyakh, ksistakh i khramakh; per. I. V. Zholtovskogo [Four books on architecture. In which, after a short treatise on the five orders and instructions most necessary for construction, are treated of private houses, roads, bridges, squares, xysts and temples]. *Pervaya kniga ob arkhitekture Andrea Palladio, 2-e stereotipnoe izd.* [The first book on the architecture of Andrea Palladio, 2nd stereotyped ed.]. Moscow: Izd-vo Vsesoyuznoy akademii arkhitektury Publ., 1938, p. 74. (In Russian)
4. Zalesskiy V. G. *Arkhitektura. Kratkiy kurs postroeniya chastey zdaniy, chitannyy v Imperatorskom moskovskom tekhnicheskoy uchilishche ad'yunkt-professorom V. G. Zalesskim, s dopolneniem populyarnogo izlozheniya sposobov poverochnogo rascheta i opredeleniya razmerov konstruktsey* [Architecture. A short course in constructing parts of buildings, read at the Imperial Moscow Technical School by associate professor V. G. Zalessky, with the addition of a popular presentation of methods for checking calculations and determining the dimensions of structures]. Moscow: Tipo-litografiya T-va I. N. Kushnerev i Ko Publ., 1904, 582 p. (In Russian)
5. Statsenko V. P. *Chasti zdaniy. (Grazhdanskaya arkhitektura). Izd. 4-e, ispr. i dop.* [Parts of buildings. (Civil architecture). Publ. 4th, corrected. and add.]. St. Petersburg: Tipografiya Shtaba Otd. Korp. pogr. strazhi Publ., 1912, 516 p. (In Russian)
6. Statsenko V. P. *Chasti zdaniy. Grazhdanskaya arkhitektura. Izd. 7-e (2-e posm.), dop. i ispr.* [Parts of buildings. Civil architecture. Publ. 7th (2nd see), add. and corrected]. M.-L.: Gosudarstvennoe izdatel'stvo Publ., 1930, 656 p. (In Russian)
7. Radivanovskiy V. I. *Stroitel'nye materialy. Vyp. 1. Estestvennye kamni* [Construction Materials. Issue 1. Natural Stones]. St. Petersburg: Tipografiya A. S. Suvorina Publ., 1890, 64 p. (In Russian)
8. Lyamin N. N. *Estestvennye kamennye stroitel'nye materialy. Vyp. I* [Natural Stone Construction Materials. Issue I]. St. Petersburg: Tipografiya P. P. Soykina Publ., 1911, 74 p. (In Russian)
9. Khar'yuzov L. S., Bulakh A. G., Savchenok A. I.; nauch. red. A. G. *BulakhPutilovskiy kamen' (plitchatyy izvestnyak) kak ob'ekt restavratsii v pamyatnikakh arkhitektury: ucheb. posobie* [Putilovsky Stone (Slabby Limestone) as an Object of Restoration in Architectural Monuments: textbook]. St. Petersburg: Izd. gos. S.-Peterb. un-ta Publ., 2012, 52 p. (In Russian)
10. *Ilyustrirovannoye Urochnoye polozhenie. Polnyy tekst po ispravlennomu ekzemplyaru s poynasnitel'nymi risunkami,*

spravochnymi svedeniyami, raschetami, prakticheskimi ukazaniyami i bankovskimi rastsenkami na stroitel'nye raboty. Posobie pri sostavlenii smet, proektirovanii i ispolnenii rabot. Okolo 800 ris. v tekste. Comp. N. I. de-Roshefor. Izd. 6-e, ispr. [Illustrated Lesson Regulations. Full text according to the corrected copy with explanatory drawings, reference information, calculations, practical instructions and bank rates for construction work. Manual for drawing up estimates, designing and executing work. About 800 figs. in the text. Comp. N. I. de Rochefort. 6th ed., corrected]. Petrograd: Sklad izdaniya u K. L. Rikker Publ., 1916, 694 p. (In Russian)

11. Fedorov P. A. *Lestnitsy kamennye, metallicheskie i derevyannye. Prakticheskoe rukovodstvo po postroyke razlichnykh lestnits dlya stroiteley, tekhnikov, domovladel'tsev, desyatnikov i t. p. S 49 ris. Izd. 2-e, znachitel'no dop.* [Stone, metal and wooden stairs. A practical guide to the construction of various ladders for builders, technicians, homeowners, foremen, etc. With 49 figs. 2nd edition, significantly expanded]. St. Petersburg: Knigoizdatel'stvo A. F. Sukhova Publ., 1912, 38 p. (In Russian)

12. *Stroitel'naya industriya. Spravochnoe rukovodstvo po grazhdanskomu i promyshlennomu stroitel'stvu. V 16 tomakh. God obshch. red.: V. I. Vel'man (gl. red.) [i dr.]. T. VII. Chasti zdaniy. Ch. 2. Pod red. inzh. N. S. Dyurnbaum, pri uchastii inzh. L. I. Onishchika* [The construction industry. A reference guide to civil and industrial construction. In 16 volumes. Year of general editorship: V. I. Velman (editor-in-chief) [and others]. — Vol. VII. Parts of buildings. Part 2. Ed. by engineer N. S. Durnbaum, with the participation of engineer L. I. Onishchik]. M.-L.: Gosstroyizdat Publ., 1933, 663 p. (In Russian)

13. Serk L. A. *Kurs arkhitektury. Grazhdanskie i promyshlennye zdaniya. T. 1. Konstruktivnye skhemy i elementy grazhdanskogo stroitel'stva* [Course in architecture. Civil and industrial buildings. T. 1. Structural schemes and elements of civil engineering]. M.-L.: Gosstroyizdat Publ., 1938, 440 p. (In Russian)

14. Onishchik L. I. *Kamennye konstruksii promyshlennykh i grazhdanskikh zdaniy* [Stone structures of industrial and civil buildings]. M.-L.: Stroyizdat Publ., 1939, 308 p. (In Russian)

15. Rozenblyumas A. M. *Kamennye konstruksii* [Stone structures]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1964, 302 p. (In Russian)

16. *SP 15.13330.2020 "SNiP II-22-81* Kamennye i armokamennye konstruksii"* [SP 15.13330.2020 "SNiP II-22-81* Stone and reinforced stone structures"]. Moscow: Minstroy Rossii Publ., 2020. (In Russian)

17. Polyakov S. V., Izmaylov Yu. V., Konovodchenko V. I., Orudzhev F. M. et al. *Kamennaya kladka iz pil'nykh izvestnyakov* [Masonry from sawn limestones]. Kishinev: Kartya Moldovenyaskie Publ., 1973, 344 p. (In Russian)

18. *GOST R 55567—2013. Poryadok organizatsii i vedeniya inzhenerno-tekhnicheskikh issledovaniy na ob'ektakh kul'turnogo naslediya. Pamyatniki istorii i kul'tury. Obshchie trebovaniya* [GOST R 55567—2013. Procedure for organizing and conducting engineering and technical research at cultural heritage sites. Historical and cultural monuments. General requirements]. Moscow: Standartinform Publ., 2014. (In Russian)

19. Krasovskiy A. K. *Grazhdanskaya arkhitektura. Chasti zdaniy* [Civil architecture. Parts of buildings]. *Soch. Apollinariya Krasovskogo* [Works of Apollinaris Krasovsky]. St. Petersburg: Tipografiya Voенno-Uchebnykh Zavedeniy Publ., 1851, 597 p. (In Russian)

20. Krasovskiy A. K. *Grazhdanskaya arkhitektura. Chasti zdaniy* [Civil architecture. Parts of buildings]. *Soch. Apollinariya Krasovskogo, Izd. 2-e* [Op. Apollinary Krasovsky. Ed. 2nd]. Moscow: Tipografiya A. A. Levenson Publ., 1886, 443 p. (In Russian)

21. Romanovich M. E. *Grazhdanskaya arkhitektura. Chasti zdaniy. V 4 tomakh. T. 2. Sost. M. E. Romanovich. Izd. 4-e* [Civil architecture. Parts of buildings. In 4 volumes. Vol. 2. Comp. M. E. Romanovich. Ed. 4th]. St. Petersburg: Tipografiya Evgeniya Tile Publ., 1903, 520 p. (In Russian)

22. Kartashov Yu. M., Matveev B. V., Mikheev G. V., Fadeev A. B. *Prochnost' i deformiruemost' gornykh porod* [Strength and deformability of rocks]. Moscow: Nedra Publ., 1979, 269 p. (In Russian)

23. Karkashadze G. G. *Mekhanicheskoe razrushenie gornykh porod.: ucheb. posobie dlya vuzov* [Mechanical

destruction of rocks: a textbook for universities]. Moscow: MGGU Publ., 2004, 222 p. (In Russian)

24. Lakhtin N. K. *Raschet arok i svodov. Rukovodstvo k analiticheskomu i graficheskomu raschetu arochnykh i svodchatykh perekrytiy. S 290 chert. v tekste i 8 tablitsami* [Calculation of arches and vaults. Guide to the analytical and graphical calculation of arched and vaulted ceilings. With 290 drawings in the text and 8 tables]. Moscow: Tipolitografiya T-va I. N. Kushnerev i Ko Publ., 1911, 468 p. (In Russian)

25. Mushketov I. V. *Kratkiy kurs petrografii dlya studentov Instituta inzhenerov putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I* [Brief course in petrography for students of the Institute of Railway Engineers of Emperor Alexander I]. *Sbornik Instituta inzhenerov putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I. Vyp. XXX. Trudy prepodavateley i materialy dlya institutskikh kursov. S 112-yu politipazhami v tekste* [Collection of the Institute of Railway Engineers of Emperor Alexander I. Issue XXX. Works of teachers and materials for institute courses. With 112 polytypes in the text]. St. Petersburg: Tipografiya Yu. N. Erlikh Publ., 1895, 202 p. (In Russian)

26. Subbotin M. P. *Stroitel'noe kamnevedenie: (tehnologiya estestvennykh stroitel'nykh kamney): s prilozheniem Geologii stroitel'nogo kamnya geologa L. E. Nalivayko* [Construction stone science: (technology of natural building stones): with the appendix Geology of building stone by geologist L. E. Nalivayko]. Khar'kov; Kiev: Gosudarstvennoe nauchno-tehnicheskoe izdatel'stvo Ukrainy Publ., 1935, 272 p. (In Russian)

27. Little Ph., Hough M., Mullarkey E. Stone cantilever stairs — inspection and analysis of cantilever stairs. *IStructE — The Structural Engineer*, April 2009, Iss. 87(8), pp. 26–33.

28. *GOST 21153.8—88. Porody gornye. Metod opredeleniya predela prochnosti pri ob'emnom szhatii* [GOST 21153.8—88. Rocks. Method for determining the ultimate strength under volume compression]. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 1986. (In Russian)

29. Hume I. Cantilever or hanging stone stairs. *IHBC. Context*. September 1997, Iss. 55, pp. 24–26.

30. Maunder E. A. W. Staircases as cantilevers or arches? — a question for limit analysis. *SAHC — London: Taylor & Francis Group*, 2015, pp. 569–575.

31. Heyman J. The mechanics of masonry stairs. *Structural studies of historical buildings, vol. 2. Dynamics, Repairs and Restoration*. Southampton: Computational Mechanics Publ., 1995, pp. 259–265.

32. O'Dwyer D., O'Connor A., Bashorun O. Assessing the probability of material failure in cantilevered stone stairs. *Proceedings of the 7th International Probabilistic Workshop*. Delft, 2009, pp. 239–249.

33. Sajtos I. Cantilevered staircase: Influence of building technology on the behavior. *SAHC — Anamnesis, diagnosis, therapy, controls — London: Taylor & Francis Group*, 2016, pp. 1254–1261.

34. Angelillo M. The Equilibrium of Helical Stairs Made of Monolithic Steps. *International Journal of Architectural Heritage*. November 2015, Iss. 10(6), pp. 675–687. DOI: 10.1080/15583058.2014.988773.

35. Rigo B., Bagi K. Discrete element analysis of stone cantilever stairs. *Meccanica*, May 2018, Iss. 53, pp. 1571–1589. DOI: 10.1007/s11012-017-0739-5.

36. D'Altri M., Jin Y., Chen J., Agyarko T. et al. Structural behavior of stone cantilever stairs: Strain monitoring under controlled loading and numerical modeling. *Journal of Building Engineering*, 2024, Iss. 95. DOI: 10.1016/j.job.2024.110238.

37. Kabantsev O. V. Diskretnaya model' kamennoy kladki v usloviyakh dvukhosnogo napryazhennogo sostoyaniya [Discrete model of stone masonry under biaxial stress conditions]. *Vestnik TGASU [Bulletin of TSUACE]*. 2015, Iss. 4, pp. 113–134. (In Russian)

38. Dreyer A. I. Razrushenie kamennykh stroitel'nykh materialov v gorodskikh postroykakh v g. Petrograde [Destruction of stone building materials in urban buildings in Petrograd]. *Materialy dlya izucheniya estestvennykh proizvoditel'nykh sil Rossii, izdavaemye Komissiey pri Rossiyskoy akademii nauk. Kamennye stroitel'nye materialy. Sbornik 1-y* [Materials for the study of natural productive forces of Russia, published by the Commission under the Russian Academy of Sciences. Stone building materials.

Collection 1]. Petrograd: Gos. uchebno-prakt. shkola-tip. im. tov. Alekseeva Publ., 1923, pp. 91–105. (In Russian)

39. Belyankin D. S. Materialy po mikroskopicheskomu issledovaniyu granitov i dr. izverzhennykh porod, ispytannykh v Mekhanicheskoy laboratorii Inst. inzh. put. soobshch. v period vremeni s 1896 po 1912 g. [Materials on microscopic study of granites and other igneous rocks tested in the Mechanical Laboratory of the Inst. ing. put. communications. in the period from 1896 to 1912]. *Materialy dlya izucheniya estestvennykh proizvoditel'nykh sil Rossii, izdavaemye Komissiyey pri Rossiyskoy akademii nauk. Kamennye stroitel'nye materialy. Sbornik 1-y* [Materials for the study of natural productive forces of Russia, published by the Commission under the Russian Academy of Sciences. Stone building materials. Collection 1]. Petrograd: Gos. uchebno-prakt. shkola-tip. im. tov. Alekseeva Publ., 1923, pp. 106–145. (In Russian)

40. Belikov B. P., Grigorovich M. B., Petrov V. P., Shoblov S. P. Prirodnye kamennye oblitsovochnye materialy (metody ikh otsenki, izucheniya i resursy) [Natural stone facing materials (methods of their assessment, study and resources)]. *Seriya "Nemetallicheskie poleznye iskopaemye"* [Series "Non-metallic useful minerals"]. Moscow: VINITI, 1975, vol. 4, 123 p. (In Russian)

41. *GOST 9479—2011. Bloki iz gornyykh porod dlya proizvodstva oblitsovochnyykh, arkhitekturno-stroitel'nykh, memorial'nykh i drugikh izdeliy. Tekhnicheskie usloviya (EN 1467:2003, NEQ)* [GOST 9479—2011. Blocks of rocks for the production of facing, architectural, construction, memorial and other products. Technical conditions (EN 1467:2003, NEQ)]. Moscow: Standartinform Publ., 2012. (In Russian)

42. *GOST 23342—2012. Izdeliya arkhitekturno-stroitel'nye iz prirodnoy kamnya. Tekhnicheskie usloviya* [GOST 23342—2012. Architectural and construction products made of natural stone. Technical conditions]. Moscow: Standartinform Publ., 2014. (In Russian)

43. *GOST R 59437—2021. Sokhraneniye pamyatnikov kamennogo zodchestva. Obshchie trebovaniya* [GOST R 59437—2021. Preservation of stone architecture monuments. General requirements]. Moscow: Standartinform, 2021. (In Russian)

44. *GOST 21153.2—84. Porody gornye. Metody opredeleniya predela prochnosti pri odnoosnom szhatii* [GOST 21153.2—84. Rocks. Methods for determining the ultimate strength under uniaxial compression]. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 1984. (In Russian)

45. *GOST 30629—2011. Materialy i izdeliya oblitsovochnye iz gornyykh porod. Metody ispytaniy* [GOST 30629—2011. Facing materials and products made of rocks. Test methods]. Moscow: Standartinform Publ., 2012. (In Russian)

46. *GOST 21153.3—85. Porody gornye. Metody opredeleniya predela prochnosti pri odnoosnom rastyazhenii* [GOST 21153.3—85. Rocks. Methods for Determining the Ultimate Strength in Uniaxial Tensile Strength]. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 1986. (In Russian)

47. *GOST 21153.6—75. Porody gornye. Metod opredeleniya predela prochnosti pri izgibe* [GOST 21153.6—75. Rocks. Method for Determining the Ultimate Strength in Bending]. Moscow, 1981. (In Russian)

48. Gryaznov T. A. *Otsenka pokazateley svoystv porod polevymi metodami* [Evaluation of Rock Property Indicators by Field Methods]. Moscow: Nedra Publ., 1984, 197 p. (In Russian)

49. Shibaev I. A., Vinnikov V. A., Stepanov G. D. *Opreделение uprugikh svoystv osadochnyykh gornyykh porod na primere obraztsov izvestnyaka s pomoshch'yu lazernoy ul'trazvukovoy diagnostiki* [Determination of Elastic Properties of Sedimentary Rocks Using Limestone Samples Using Laser Ultrasonic Diagnostics]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Information and Analytical Bulletin]. 2017, Iss. 11, pp. 68–75. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-125-134. (In Russian)

50. Galunin A. A., Gapeev A. A., Pospichal V. *Otsenka zavisimosti dinamicheskikh moduley uprugosti ot poristosti obraztsov izvestnyaka metodom impul'snoy diagnostiki* [Evaluation of the dependence of dynamic elastic moduli on the porosity of limestone samples using the pulse diagnostics method]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Information and Analytical Bulletin]. 2017, Iss. 4-1, pp. 98–107. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_98. (In Russian)

51. Osipov Yu. V., Koshelev A. E. Sovremennye sposoby opredeleniya deformatsionnykh svoystv gornyx porod [Modern methods for determining the deformation properties of rocks]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining information and analytical bulletin]. 2020, Iss. 7, pp. 125–134. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-0-68-75. (In Russian)

52. *Prilozhenie k prikazu Ministroya RF №1056/pr ot 31.07.2017. Sbornik № 4. Restavratsiya i vossozhdanie konstruktsiy i dekora iz estestvennogo kamnya. Prilozhenie 3* [Appendix to the order of the Ministry of Construction of the Russian Federation No. 1056/pr dated July 31, 2017.

Collection No. 4. Restoration and recreation of structures and decor made of natural stone. Appendix 3]. (In Russian)

Received: April 05, 2025

Accepted: May 15, 2025

Author's information:

Mikhail D. VEBER — Senior Structural Engineer;
mischaweber@mail.ru

Anatoly V. KUZNETSOV — PhD in Engineering,
Associate Professor, Department of Building Structures,
Buildings and Structures; akuznetsov@pgups.ru