

Канд. техн. наук, доцент **Ю.М. Пучков**  
(Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства)  
Контактная информация: puchkovteam@yandex.ru

---

*Приведены общие сведения о капиллярно-пористых материалах каменных мостов. Установлена возрастающая роль водорастворимых солей как разрушающего фактора. Выявлен механизм солевой формы коррозии каменных кладок. Представлены результаты исследований состояния каменных сооружений, разрушающихся под действием водорастворимых солей, а также результаты исследований по определению оптимальной плотности постоянного тока для обессоливания кладок. Предложены технические мероприятия по повышению долговечности засоленных каменных мостов.*

**Ключевые слова:** каменные мосты, водорастворимые соли, источники солей, противогололедные материалы, миграция солей, солевая коррозия, высолы, ослабление кладки, вывал, сорбционная способность, капилляр, кристаллогидрат соли, разрушение камня, способы обессоливания, электроосмос, мониторинг, долговечность.

---

Каменные мосты и акведуки Европы, построенные еще до нашей эры, оказались настолько долговечными, что некоторые из них продолжают существовать в наше время. Их главными конструктивными элементами являются арки и своды, которые за счет своей геометрической формы обеспечивают наиболее выгодную работу каменных кладок на сжатие, что во многом обеспечивает уникальную долговечность таких сооружений. Даже при значительном выщелачивании растворной части из кладки, а также заметных деформациях эти арочно-сводчатые сооружения способны оставаться достаточно прочными и устойчивыми.

В России каменные мосты строились в XII-XX веках. Несколько десятков из них продолжают эксплуатироваться на федеральных автомобильных дорогах, другие – на дорогах местного значения.

Материалами для мостовых конструкций служили: известняк, песчаник, гранит, кирпич. При выполнении ремонтных работ или реконструкции могли применяться и другие материалы.

Так, в 2000 г. на автомобильной дороге М4 «Дон» сдан в эксплуатацию после ремонта мост 1928 г. постройки через р. Пахру. Арочные своды пролетных строений выполнены из гранита, лицевые грани – из

песчаника. Надсводное строение среднего пролета сложено из кирпича, песчаника и известняка, а крайних пролетов – из бутового камня.

Кроме того, следует упомянуть о недавней реконструкции моста через р. Златогоровку (постройка 1890 г., материал – песчаник) на федеральной автомобильной дороге М-5 «Урал», для уширения свода которого были применены железобетонные арки.

В процессе эксплуатации конструкции каменных мостов подвергаются целому ряду воздействий, что сокращает срок их службы. К таким воздействиям следует отнести: механические (силовые) и физико-химические. К механическим воздействиям каменные мосты достаточно устойчивы, что подтверждается практикой их эксплуатации. К физико-химическим воздействиям могут быть отнесены: колебания температуры и скорости движения воздуха, атмосферные осадки в виде дождя, града, снега, содержащие кислоты, соли и другие химические вещества, выхлопные газы двигателей, звуковые колебания, биологические вредители и др. Из перечисленного выше следует особо выделить соли, воздействие которых на конструкции либо игнорируется, либо недооценивается.

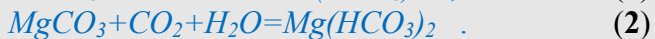
Все материалы, из которых выполнены каменные мосты, характеризуются капиллярно-пористой структурой, которая предопределяет общность разрушительных процессов, происходящих в конструкциях. Под воздействием капиллярных сил, в зависимости от параметров окружающей среды, происходит проникновение влаги в конструкции в жидком или парообразном виде, в том числе содержащей агрессивные составляющие [1, 2].

Исследования, проведенные в последние десятилетия, свидетельствуют о все возрастающей роли водорастворимых солей как разрушающего фактора. Это связано с постоянно растущей загрязненностью атмосферы промышленных районов и высокой минерализацией природных вод [3, 4].

С течением времени соли накапливаются в каменных конструкциях. Источниками соленакопления могут быть природные воды, которые всегда содержат некоторое количество солей, зависящее от физико-географических условий. Существует классификация воды по солесодержанию: пресные воды – солесодержание до 1 г/л; солоноватые воды – солесодержание 1-10 г/л; соленые воды – солесодержание 10-50 г/л; рассолы – солесодержание более 50 г/л.

Так, например, в грунтовых водах Подмосковной котловины, а также в водах рек Волги, Оки, Клязьмы и их притоков содержится большое количество сульфатов.

Деятельность микроорганизмов, существующих в грунтах, обогащает грунтовые воды двуокисью углерода, в результате чего получается разбавленный раствор угольной кислоты, способной образовывать карбонаты:



Образующиеся карбонаты *Ca* и *Mg* при наличии серной кислоты вступают в реакции обмена с образованием сульфатов *CaSO<sub>4</sub>* и *MgSO<sub>4</sub>*. Подобные химические превращения являются опасными для кладок из известняка, состоящего из карбоната кальция *CaCO<sub>3</sub>* и доломита *CaCO<sub>3</sub>\*MgCO<sub>3</sub>*, которые, реагируя с углекислотой, переходят в жидкую фазу. Образующиеся сульфаты разрушают практически любой капиллярно-пористый материал.

Следует отметить, что в России обширные территории занимают засоленные почвы, которые содержат легко растворимые сульфаты и хлориды, при этом большое количество солей вносится в почвы в виде удобрений.

Загрязнение солями происходит, в том числе в результате выбросов в атмосферу отходов производства. Так, по данным «Беларуськалий», заводами этого производителя ежегодно может выбрасываться в атмосферу до 364 т неорганической пыли, представляющей собой смесь солей *KCl*, *NaCl*, *MgCl<sub>2</sub>*, *CaSO<sub>4</sub>*, *CaCl<sub>2</sub>*.

Концентрации содержащихся в осадках ионов представляют ряд (по мере убывания):



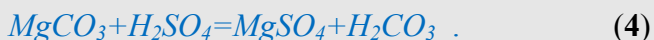
Указанное соотношение ионов довольно устойчиво для континентальных районов. Влияние морей проявляется в увеличении хлоридов в осадках, выпадающих в прибрежных районах. С поверхности морей и океанов в атмосферу ежегодно поднимается в виде аэрозолей около  $10^{10}$  тонн соли.

В конце XX века из дымовых газов только в Московской области можно было получить за год до 500 000 т серной кислоты, в Париже – 200 000 т, в Вене – 78 000 т.

Выхлопные газы автомобилей содержат около 200 химических веществ, на основе которых могут быть образованы водорастворимые соли.

Наиболее распространенными в атмосфере и наиболее опасными для каменных конструкций из всех воздушных загрязнений являются

сернистый ангидрид ( $SO_2$ ) и сероводород ( $H_2S$ ), которые образуют серную кислоту, а затем сульфаты:



Сами материалы, из которых сложены конструкции, могут содержать в себе водорастворимые соли. В [5] указывается, что в обыкновенном глиняном кирпиче могут содержаться карбонаты  $CaCO_3$ ,  $MgCO_3$ , гипс  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ , сульфаты  $Na_2SO_4$ ,  $MgSO_4$ ,  $CaSO_4$ , причем, при изменениях температурно-влажностного режима соли могут образовывать кристаллогидраты с увеличением объема. В частности, сульфат натрия кристаллизуется в порах обожженного кирпича с 10 молекулами воды. Кроме того, при хранении глины в холодный период года в нее вводятся хлориды  $CaCl_2$  и  $NaCl$ .

Согласно требованиям к уровню зимнего содержания автомобильных дорог [6], уплотненный снежный покров на проезжей части мостовых сооружений не допускается, что приводит к необходимости плавить снежно-ледяные образования. С этой целью используются противогололедные материалы, в состав которых могут входить соли  $NaCl$ ,  $CaCl_2$ ,  $MgCl_2$ ,  $KCl$ , а также соль муравьиной кислоты: формиат натрия  $HCOONa$  [7, 8]. Отметим, что формиат натрия при температуре плюс  $15,3^\circ C$  из водных растворов кристаллизуется в тригидрат ( $HCOONa \cdot 3H_2O$ ), в интервале от плюс  $15,3^\circ C$  до минус  $27,9^\circ C$  – в дигидрат ( $HCOONa \cdot 2H_2O$ ), а ниже минус  $27,9^\circ C$  – в безводную соль.

Можно предположить, что при переходе из одной кристаллогидратной формы в другую кристаллы формиата натрия могут изменять свой объем и при увеличении его оказывать давление на стенки пор и капилляров.

Разнообразие источников водорастворимых солей и капиллярно-пористая структура каменных конструкций обеспечивают присутствие в них влаги и солей, которые распределяются по объему кладки.

Распределение влаги и солей по толщине кладки было исследовано путем отбора проб на Мостовой башне постройки 1671-1679 гг., которая находится на Измайловском острове в г. Москве и является уцелевшей частью каменного моста (рис. 1). Исследования проводились в июле 1981 г. и в апреле 1982 г. Стены Мостовой башни сложены из кирпича и имеют толщину 75 см. По сути, сооружение может рассматриваться как мостовой устой, поскольку расположен на берегу водоема.



*Рис. 1. Мостовая башня XVII века, Измайловский комплекс, г. Москва (в процессе текущего ремонта)*

Полученные данные (табл. 1) показывают, что влага, а вместе с ней и соли поднимаются по кладке из грунта при отсутствии горизонтальной гидроизоляции. Влага и соли мигрируют по капиллярам кладки Мостовой башни и распределяются неравномерно.

**Таблица 1**

*Характерное распределение влаги и солей по толщине стены Мостовой башни в Измайлово (г. Москва) на отметке +3,2 м*

<i>Глубина отбора пробы от внутренней стороны стены, см</i>	<i>Влага, % по массе</i>	<i>Соль, % по массе</i>
<i>июль 1981 г. / апрель 1982 г.</i>		
<i>0</i>	6,0 / 7,3	3,5 / 3,7
<i>10</i>	13,5 / 7,3	1,0 / 0,8
<i>20</i>	8,1 / 7,0	0,5 / 0,4
<i>30</i>	7,5 / 4,5	0,3 / 0,25
<i>40</i>	9,7 / 7,3	0,25 / 0,2
<i>50</i>	14,1 / 9,0	0,2 / 0,5
<i>60</i>	15,5 / 11,0	0,25 / 0,5
<i>70</i>	12,0 / 8,2	0,5 / 1,0
<i>75</i>	5,0 / 8,3	0,4 / 12,0

Влажность стены изменяется от 5 % до 15,5 % по массе и является более высокой во внутренних слоях, а солесодержание – от 0,2 % до 12 % по массе. Максимально засоленными оказываются наружные слои стены в теплые периоды года.

Исследованиями Мостовой башни установлено, что результаты разрушающих процессов проявляются по-разному в зависимости от времени года. В конце холодного периода года эти проявления выражены наиболее заметно: наблюдается шелушение и осыпание кирпича на наружной поверхности стен. С наступлением теплого периода все фасады башни до отметки +15,60 покрываются белесыми пятнами высолов, не сходящими до зимы.

Процесс разрушения начинается с поверхностных слоев и распространяется в глубину кладки.

Соли мигрируют в жидкой фазе и начинают проявлять себя как разрушающий фактор при достижении их содержания на участке кладки от 1 % по массе.

В ноябре 2014 г. было проведено обследование подвальной части кирпичного здания на бутовом фундаменте постройки 1895-1897 гг. в г. Пензе (**рис. 2-4**). Первоначально здание предназначалось для торговли мясом; для обеспечения хранения продукции в подвальной части данного здания использовалась соль, воздействие которой проявилось на состоянии стен.

Из-за неравномерного распределения в кладке влаги и солей по ее объему она в различной степени подвержена физической коррозии солевой формы.



*Рис. 2. Характерные признаки солевой коррозии: высолы, чешуйки, лежачки кирпича, осыпающиеся при прикосновении (степень 1) – подвальная часть кирпичного здания (г. Пенза)*



*Рис. 3. На кирпичной кладке высолы и повреждения кирпичей с поверхности в виде каверн на всю площадь ложка (степень 2).  
Коррозия стальных элементов с расслоением металла –  
подвальная часть кирпичного здания (г. Пенза)*

В результате засоления кладочный раствор на некоторых участках практически полностью утратил прочность, что привело к нескольким вывалам кладки и создало угрозу обрушения сводчатого перекрытия над подвалом.



*Рис. 4. Вывал наружной стены подвала с внутренней стороны из-за выпучивания; на удерживающихся участках кладки –  
обильные высолы (степень 3) –  
подвальная часть кирпичного здания (г. Пенза)*

При обследовании подвальной части здания использовался электронный влагомер МГ-4У, при помощи которого установлена влажность засоленной кирпичной кладки на различных участках от 9 до 19 % по массе.

Измерение прочности кирпича в кладке стен подвальной части здания проводилось методом ударно-импульсного действия с использованием прибора «ОНИКС-2.5». Прибор позволяет определять прочность материалов по ударному импульсу и отскоку в диапазоне от 1 до 100 МПа.

Среднее значение прочности кирпича, определенное при помощи прибора «ОНИКС-2.5», составило 6,1 МПа. При испытаниях отобранных образцов кирпича на сжатие в сертифицированной лаборатории при помощи прессы средняя величина прочности составила 5,8 МПа. Разница в значениях прочности на сжатие связана с тем, что измерения в натуральных условиях проводились на массивной, связанной раствором в единый элемент, конструкции, а в лабораторных условиях прочность определялась на отдельных образцах. В соответствии с [9] наименьший предел прочности при сжатии для отдельного образца кирпича керамического должен составлять 7,5 МПа (75 кг/см<sup>2</sup>).

Прочность кладочного раствора настолько снизилась из-за перувлажнения и солевой коррозии, что на многих участках стены отдельные кирпичи можно было извлечь вручную.

В каменных мостах наиболее серьезным повреждением является ослабление камней в кладке свода, в результате которого может произойти их вывал. При вывале камней на большом участке свода через ослабленное место может произойти высыпание засыпки свода, вывал соседних камней, что может создать угрозу безопасности дорожного движения.

Опасное ослабление кладки свода моста в присутствии водорастворимых солей является лишь вопросом времени.

Влагосодержание каменных кладок не может быть стабильным, поскольку постоянно меняются температура и влажность среды, вызывая попеременное увлажнение-высыхание камня.

В формировании влажностного режима кладок большое значение имеют такие характеристики их материалов, как сорбционная способность, паропроницаемость и теплопроводность. При солевом воздействии неизбежны существенные изменения этих характеристик.

Следует подчеркнуть, что из трех перечисленных характеристик влажностного режима каменных кладок ведущую роль при его формировании играет сорбционная способность материалов, которая значительно возрастает с их засоленностью.



Так, сорбционная способность (способность поглощать влагу из воздуха) глиняного кирпича возрастает с 0,9 до 14 % по массе при засолении хлоридом натрия на 0,9 % по массе [10].

Повышение сорбционной способности материалов, в порах которых находится раствор солей, объясняется тем, что равновесное давление водяного пара над поверхностью раствора меньше, чем давление насыщенного водяного пара над водой, что приводит к снижению порога конденсации.

Например, критическое значение относительной влажности воздуха, соответствующее условиям выпадения конденсата в присутствии насыщенных растворов некоторых солей при  $t=+20^{\circ}\text{C}$  в капиллярах с  $r=0,3\cdot 10^{-5}$  м равно:

- для  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  – 80 %;
- для  $\text{NaCl}$  – 75 %;
- для  $\text{KCl}$  – 83 %;
- для  $\text{CaCl}_2$  – 32 %;
- для  $\text{MgCl}_2$  – 33 %;
- для  $\text{H}_2\text{O}$  – 96 %.

В силу гигроскопичности солей засоленный материал не может быть сухим, поэтому в условиях постоянно изменяющейся температуры и относительной влажности окружающего воздуха, он подвергается более частому попеременному увлажнению-высыханию, что приводит к более интенсивному разрушению структуры засоленного материала по сравнению с незасоленным. Причиной такого разрушения являются капиллярные силы, сжимающие скелет материала, которые начинают проявляться при испарении влаги из микрокапилляров радиусом  $5\cdot 10^{-5}$  м [11]. Так, после 50 циклов увлажнения-высыхания кирпич теряет 25 % прочности при испытании на изгиб. Кроме того, в процессе попеременного увлажнения-высыхания материала могут создаваться условия для образования кристаллогидратов солей с увеличением их объема, что влечет за собой разрушение структуры материала.

В старинных каменных кладках распространена сульфатная форма выветривания, которая отмечается и на современных сооружениях.

Сущность сульфатного выветривания состоит в следующем: постоянное испарение влаги с поверхности камня компенсируется ее притоком из внутренних частей кладки, куда она попадает вследствие капиллярного подсоса минерализованных грунтовых вод; в зависимости от концентрации раствора и температурно-влажностного режима конструкций развиваются процессы отложения и кристаллизации солей на

поверхности и процессы кристаллизации солей внутри кладки по мере отступления фронта жидкой влаги вглубь. Наиболее значительные исследования в изучении этих явлений провели В.Я. Степанов, К.П. Флоренский, М.В. Рудько [12]. Разрушающее действие сульфатов, в основном, связано с увеличением объема твердой фазы при переходе одной кристаллогидратной формы солей в другую, в результате чего возникают значительные давления на стенки пор материала.

В табл. 2 приведены значения увеличения объема твердой фазы некоторых солей после взаимодействия с серной кислотой. Можно отметить, что такое увеличение происходит в диапазоне температур от  $-3^{\circ}\text{C}$  до  $+48^{\circ}\text{C}$ . Значения температур внутренних слоев кладок, входящие в указанный диапазон, фиксировались при комплексном исследовании Мостовой башни в Измайлово (г. Москва), на которой были отмечены следы сильного солевого разрушения.

Кристаллы хлоридов тоже могут увеличивать свой объем. Так, при превращении хлористого натрия в дигидрат удельный объем твердой фазы увеличивается на 130 %.

В результате накопления кристаллов солей в порах возникают внутренние давления. При высыхании растворов солей и их кристаллизации в порах развиваются растягивающие напряжения около  $6-7 \text{ кг/см}^2$ .

**Таблица 2**

*Увеличение объема твердой фазы некоторых солей  
после взаимодействия с серной кислотой*

<i>Вещество до реакции</i>	<i>Вещество после реакции</i>	<i>Увеличение объема, %</i>	<i>Температура образования, °C</i>
<i>Карбонат кальция, <math>\text{CaCO}_3</math></i>	Сульфат кальция, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	100	-
<i>Карбонат магния, <math>\text{MgCO}_3</math></i>	Сульфат магния, $\text{MgSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	- 430	- 3...+1 +1...+48
<i>Карбонат натрия, <math>\text{Na}_2\text{CO}_3</math></i>	Сульфат натрия, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	- 380	+1...+32 -

Такие напряжения способны разрушить кладочный раствор, белый камень, а также кирпич высоких марок. Для таких пористых материалов опасными считаются растворы, содержащие 0,1 % сульфатов.

К сожалению, в настоящее время отсутствуют фундаментальные исследования развития кристаллизационного давления, оказываемого солями на стенки пор строительных материалов.

Исследования показывают, что засоление каменных конструкций вполне вероятно. Такой процесс является фактором, существенно усугубляющим разрушение кладок, сокращающим долговечность и при этом не учитываемым в практике эксплуатации сооружений, в том числе мостов.

Тем не менее, для обессоливания поверхностей каменных конструкций существует ряд способов. Для борьбы с сульфатной коррозией известняков предлагается простая очистка щеткой разрушающейся поверхности от кристаллов солей или очистка в сочетании с многократным промыванием струей воды в летнее время, которая может снизить количество солей в стене. При этом важно убирать хлопья солей и отводить промывочную воду по желобам от стены, чтобы избежать ее повторного засоления [12].

Возможно капиллярное промывание стены в жаркое время года при помощи прижатых к стене желобов с водой, одним из бортиков которых является сама стена. Вода впитывается материалом стены и, испаряясь на другом участке, выносит на поверхность соли, с которой они удаляются щеткой.

Известен способ удаления водорастворимых солей путем наложения на очищенную от кристаллов солей поверхность мокрых бумажных масс (пульп). По мере высыхания пульпы растворенные соли подтягиваются из толщи стены к поверхности и кристаллизуются в пульпе, которая периодически заменяется.

Существует способ удаления солей из кладки, в котором вместо бумажных масс используют жидкий глиняный шликер.

Перечисленные способы дают возможность удалить соли только из поверхностных слоев кладки и являются плохо управляемыми, так как при определенном сочетании температуры и влажности конструкции и наружного воздуха кристаллизация солей может произойти не на поверхности, откуда соли могут быть удалены, а в толще стены.

С точки зрения объемного обессоливания более интересными являются электро-кинетические способы.

В 1809 г. профессором Московского университета Ф. Рейссом экспериментально было открыто явление электроосмоса. Теория электроосмоса разработана другими исследователями позже [13].

Перенос жидкости в капилляре под действием постоянного электрического тока обуславливается разделением зарядов на границе двух фаз и образованием двойного электрического слоя ( $\zeta$ -потенциал). В ре-

зультате электролитической диссоциации положительные ионы собираются вблизи отрицательно заряженной стенки капилляра, в то время как к середине капилляра плотность этих зарядов уменьшается. В целом раствор остается электрически нейтральным. Если приложить к капилляру постоянное напряжение, то положительные ионы по необходимости будут двигаться к отрицательному полюсу источника тока, при этом в движение втягиваются молекулы воды в силу их дипольных свойств.

В соответствии с законом течения Гельмгольца-Смолуховского скорость движения раствора в капилляре тем выше, чем более разбавленным является раствор. Следовательно, по мере обессоливания кладки при ее постоянном увлажнении водой, процесс электроосмоса прогрессирует.

Процесс электроосмоса может протекать в узких капиллярах, радиусом менее  $10^{-5}$  м. В таких капиллярах раствор имеет очень тонкий слой свободной жидкости, легко вовлекаемый положительными ионами в электроосмотическое движение. В более широких капиллярах ионы свободной жидкости перемещаются к соответствующим электродам по законам электролиза Фарадея.

При наличии в межэлектродном пространстве капиллярно-пористого материала у анода и катода происходит накопление продуктов электролиза (соответственно кислоты и щелочи), диффузия которых вглубь раствора осложняется наличием материала (явление диализа).

Таким образом, при действии постоянного тока на капиллярно-пористую систему, заполненную раствором солей, имеет место одновременное протекание электроосмоса, электролиза и диализа с их взаимным влиянием, но в зависимости от сочетания различных факторов, превалирует тот или иной процесс. Подобрав определенные значения внешних электрических параметров, можно добиться преобладания электроосмоса.

В лабораторных условиях на засоленных образцах из кирпича эта задача решалась при помощи планирования эксперимента и математико-статистической обработки данных [14]. Была выявлена оптимальная плотность постоянного тока для эффективного обессоливания каменной кладки, которая должна составлять  $0,9 \text{ А/м}^2$  поперечного сечения конструктивного элемента. Следует отметить положительный опыт обессоливания участка стены Мостовой башни Измайловского комплекса при помощи опытной установки. Однако целесообразность применения электрических установок постоянного тока на армированных конструкциях вызывает достаточно большие сомнения, поскольку арматура может быть серьезно повреждена из-за электрохимических процессов.

Для реализации электрокинетических способов обессоливания каких-либо каменных конструкций требуется специальный проект, включающий разработку электрической установки и соответствующее материально-техническое обеспечение. Тем не менее, такие способы могут использоваться для повышения долговечности каменных конструкций мостов, многие из которых являются памятниками инженерного искусства.

Для повышения долговечности каменных мостов, минимизации солевой формы коррозии предлагаются следующие технические мероприятия:

- мониторинг каменных конструкций мостов путем отбора проб и их анализа на солесодержание;
- сокращение применения солей в противогололедных смесях для мостовых переходов;
- обеспечение эффективного водоотведения при ремонте и реконструкции мостов;
- обеспечение надежной гидроизоляции мостовых пролетов и опор при ремонте и реконструкции мостов;
- обессоливание каменных конструкций мостов экономически обоснованными механическими, поверхностными и электрокинетическими способами.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Караулов Е.В. Каменные конструкции. Их развитие и сохранение / Е.В. Караулов – М.: Изд-во. литер. по стр-ву. – 1966. – 240 с.
2. Ковельман И.А. Коррозия и разрушение каменных сооружений / И.А. Ковельман. – М.;Л.: Изд-во. Наркомхоза РСФСР, 1939. – 109 с.
3. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы / М.Е. Берлянд – Л.: Гидрометеоиздат, 1975. – 448 с.
4. Гаццола П. Консервация и реставрация памятников и исторических зданий: пер. с франц. / П. Гаццола, Х. Дайфуку, Э.А. Конелли – М.: Стройиздат, 1978. – 320 с.
5. Нагибин Г.В. Технология строительной керамики / Г.В. Нагибин. – М.: Высшая школа, 1968. – 359 с.
6. ГОСТ 33181-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Требования к уровню зимнего содержания. – М.: Стандартинформ, 2016. – 9 с.
7. Бобков А.В. Влияние теплофизических характеристик противогололедных материалов на разрушение снежно-ледяных образований на автомобильных дорогах / А.В. Бобков, А.В. Кочетков, С.П. Аржанухина // ДОРОГИ И МОСТЫ. – 2017. – Вып. 37/1. – С. 156-170.

8. Розов С.Ю. Использование муравьиной кислоты для улучшения свойств противогололедных материалов на основе хлоридов / С.Ю. Розов, И.А. Паткина, Ю.Н. Розов, А.Ю. Шестаченко // ДОРОГИ И МОСТЫ. – 2016. – Вып. 36/2. – С. 69-83.
9. ГОСТ 530-2007. Кирпич и камень керамические. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2013. – 31 с.
10. Дегтярев О.В. Исследование влажностного состояния ограждающих конструкций зданий в условиях солевого воздействия : автореф. дис. ... канд. техн. наук / О.В. Дегтярев, НИИ СФ. – М., 1971. – 22 с.
11. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика / П.А. Ребиндер. – М.: Гостехиздат, 1958. – 64 с.
12. Степанов В.Я. Опыт борьбы с разрушением камня в памятниках архитектуры XII-XIII веков / В.Я. Степанов, К.П. Флоренский, М.В. Рудько // Памятники культуры: сб. ст. – М.: изд-во АН СССР, 1960. – Вып. 2. – С. 209-230.
13. Григоров О.Н. Электрокинетические свойства капиллярных систем / О.Н. Григоров // Монографический сборник под ред. акад. Ребиндера П.А. – М.; Л.: АН СССР, 1956. – 351 с.
14. Пучков Ю.М. Моделирование процесса обессоливания каменных конструкций / Ю.М. Пучков // Моделирование и механика конструкций. – 2016. – № 3. – 8 с.

## L I T E R A T U R A

1. Karaulov E.V. Kamennye konstrukcii. Ih razvitie i sohranenie / E.V. Karaulov – М.: Izd-vo. liter. po str-vu. – 1966. – 240 s.
2. Kovel'man I.A. Korrozija i razrushenie kamennyh sooruzhenij / I.A. Kovel'man. – М.; Л.: Izd-vo. Narkomhoza RSFSR, 1939. – 109 s.
3. Berljand M.E. Sovremennye problemy atmosfernoj diffuzii i zagriznenija atmosfery / M.E. Berljand – L.: Gidrometeoizdat, 1975. – 448 s.
4. Gaccola P. Konservacija i restavracija pamjatnikov i istoricheskikh zdanij: per. s franc. / P. Gaccola, H. Dajfuku, Je.A. Konelli – М.: Strojizdat, 1978. – 320 s.
5. Nagibin G.V. Tehnologija stroitel'noj keramiki / G.V. Nagibin. – М.: Vysshaja shkola, 1968. – 359 s.
6. GOST 33181-2014. Dorogi avtomobil'nye obshhego pol'zovanija. Trebovanija k urovnju zimnego soderzhaniya. – М.: Standartinform, 2016. – 9 s.
7. Bobkov A.V. Vlijanie teplofizicheskikh harakteristik protivogolodnyh materialov na razrushenie snezhnoledjanyh obrazovanij na avtomobil'nyh dorogah / A.V. Bobkov, A.V. Kochetkov, S.P. Arzhanuhina // DOROGI I MOSTY. – 2017. – Vyp. 37/1. – S. 156-170.
8. Rozov S.Ju. Ispol'zovanie murav'inoj kisloty dlja uluchshenija svojstv protivogolodnyh materialov na osnove hloridov / S.Ju. Rozov, I.A. Patkina, Ju.N. Rozov, A.Ju. Shestachenko // DOROGI I MOSTY. – 2016. – Vyp. 36/2. – S. 69-83.

9. GOST 530-2007. Kirpich i kamen' keramicheskie. Obshhie tehicheskie uslovija. – M.: Standartinform, 2013. – 31 s.
10. Degtjarev O.V. Issledovanie vlazhnostnogo sostojanija ograzhdajushhih konstrukcij zdanij v uslovijah solevogo vozdejstvija : avtoref. dis....kand. tehn. nauk / O.V. Degtjarev, NII SF. – M., 1971. – 22 s.
11. Rebinder P.A. Fiziko-himicheskaja mehanika / P.A. Rebinder. – M.: Gostehizdat, 1958. – 64 s.
12. Stepanov V.Ja. Opyt bor'by s razrusheniem kamnja v pamjatnikah arhitektury XII-XIII vekov / V.Ja. Stepanov, K.P. Florenskij, M.V. Rud'ko // Pamjatniki kul'tury: sb. st. – M.: izd-vo AN SSSR, 1960. – Vyp. 2. – S. 209-230.
13. Grigorov O.N. Jelektrokineticheskie svojstva kapilljarnyh sistem / O.N. Grigorov // Monograficheskij sbornik pod red. akad. Rebintera P.A. – M.; L.: AN SSSR, 1956. – 351 s.
14. Puchkov Ju.M. Modelirovanie processa obessolivanija kamennyh konstrukcij / Ju.M. Puchkov // Modelirovanie i mehanika konstrukcij. – 2016. – # 3. – 8 s.

---

### **STONE BRIDGES AND SALT FORM OF CORROSION**

*Ph. D. (Tech.), Associated Professor* **Yu.M. Puchkov**  
*(Penza State University  
 architecture and construction)*  
 Cont. information: [puchkovteam@yandex.ru](mailto:puchkovteam@yandex.ru)

*General information about capillary-porous materials of stone bridges is given. The increasing role of water-soluble salts as a destructive factor has been found out. The mechanism of the salt form of corrosion of stone construction is revealed. The research results of the condition of stone structures that are destroyed by the action of water-soluble salts are presented, as well as the research results on determining the optimum direct current density for masonry desalting. Technical measures for increasing the longevity of saline stone bridges are proposed.*

**Key words:** *stone bridges, water-soluble salts, sources of salts, deicing materials, salt migration, salt corrosion, salt efflorescence, masonry weakening, inrush, sorption capacity, capillary, salt crystalline hydrate, stone destruction, demineralization methods, electroosmosis, monitoring, durability.*

---

Рецензент: канд. техн. наук А.В. Бобков (ФАУ «РОСДОРНИИ»)  
 Статья поступила в редакцию: 29.03.2018 г.