

# БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

УДК 692.23:691:54-185:54-145.1

DOI: 10.22227/1997-0935.2019.5.570-588

## Безопасная эксплуатация наружных ограждающих конструкций зданий при неблагоприятном воздействии среды

Т.Ф. Ельчищева

Тамбовский государственный технический университет (ТГТУ), 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Рассмотрен вопрос безопасности среды жизнедеятельности человека в сфере строительства и эксплуатации зданий, который включает, наряду с другими видами безопасности, термическую, биологическую и механическую безопасности. Последние могут не обеспечиваться при наличии в строительном материале наружных ограждающих конструкций неорганических гигроскопических солей вследствие их влияния на теплофизические, механические и другие характеристики материалов. Определен коэффициент теплопроводности влажных засоленных строительных материалов на разработанной установке, действующей по принципу нестационарного теплового режима. Проведен статистический анализ результатов исследования теплопроводности материалов различной структуры и плотности и выявлена значимость влияния фактора «солесодержание» на теплопроводность засоленных материалов по сравнению с контрольными образцами, не содержащими соли.

**Материалы и методы.** В качестве строительных материалов для исследования были выбраны кирпич силикатный автоклавный и керамический плотностью 1800 кг/м<sup>3</sup>, пеносиликат автоклавный плотностью 650 кг/м<sup>3</sup>, арболит плотностью 616 кг/м<sup>3</sup> и минераловатные плиты плотностью 150 кг/м<sup>3</sup>. Использовались общепринятые методики лабораторных исследований и статистической обработки результатов эксперимента. Методика лабораторных исследований включала подготовку, засоление хлоридом натрия, сульфатом калия и хлоридом кальция и замеры коэффициента теплопроводности образцов строительных материалов.

**Результаты.** Определение теплопроводности увлажненных засоленных материалов при нестационарном тепловом режиме позволило исключить сушку образцов и миграцию солей и влаги. Наличие кристаллов солей повышает теплопроводность сухих материалов до 80 % (отн.). Увлажнение образцов способствует растворению кристаллов и понижению коэффициента теплопроводности образцов до значений меньших, чем у образцов с такой же влажностью, но без соли.

**Выводы.** Проведенное исследование доказывает значимость влияния засоления на теплофизические характеристики строительных материалов, что необходимо учитывать при теплотехнических расчетах наружных ограждающих конструкций и прогнозировании их влажностного состояния при эксплуатации.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** гигроскопические соли, наружные ограждающие конструкции, агрессивная солевая среда, безопасная эксплуатация, внутрипоровое вещество, отказ ограждающих конструкций, эксплуатационные качества, коэффициент теплопроводности, парциальное давление насыщенного водяного пара, влажностный режим

*Благодарности.* Автор выражает благодарность академику РААСН В.Т. Ерофееву за научное консультирование работы.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Ельчищева Т.Ф. Безопасная эксплуатация наружных ограждающих конструкций зданий при неблагоприятном воздействии среды // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 5. С. 570–588. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.5.570-588

## Safe usage of external enclosures under adverse environmental exposure

Tatiana F. Elchishcheva

Tambov State Technical University (TSTU), 106 Sovetskaya st., Tambov, 392000, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The study considers the issue of safety of the human vital activity environment in the field of construction and usage of buildings, which includes, along with other types of safety, thermal, biological and mechanical safety. The last ones cannot be provided if there are inorganic hygroscopic salts in construction materials of external enclosures due to influence of the salts on the thermal, mechanical and other properties of the materials. Thermal conductivity coefficient of damped saline construction materials is determined on a developed experimental facility operating according to the principle of unsteady thermal conditions. A statistical analysis of the experimental results on thermal conductivity of materials possessing various structures and densities is carried out. Significance of the influence of the "salt content" factor on the thermal conductivity of saline materials in comparison with control non-saline samples is revealed.

**Materials and methods.** Construction materials for the study are selected as follows: autoclave lime-and-sand brick and burnt brick with a density of 1800 kg/m<sup>3</sup>, autoclave foamed silicate with a density of 650 kg/m<sup>3</sup>, wood concrete with a density of 616 kg/m<sup>3</sup> and mineral wool slabs with a density of 150 kg/m<sup>3</sup>. The generally accepted methods of laboratory research

and statistical processing of experimental results are used. Laboratory methods include preparation, salinization with sodium chloride, potassium sulfate and calcium chloride, and measurements of the thermal conductivity coefficient of construction material samples.

**Results.** The determination of thermal conductivity of wetted saline materials under unsteady thermal conditions makes it possible to eliminate drying of the samples and migration of salts and moisture. The presence of salt crystals increases the thermal conductivity of dry materials up to 80 % (rel.). Damping the samples promotes the dissolution of the crystals and lowering the thermal conductivity of the samples to values lower than those of non-saline samples with the same moisture content.

**Conclusions.** The study proves the significance of the salinization effect on the thermal and physical characteristics of construction materials that must be taken into account when thermal engineering calculating external enclosures and predicting their moisture state during usage.

**KEYWORDS:** hygroscopic salts, external enclosures, aggressive salt environment, safe usage, interstitial substance, enclosure fault, in-use performance, thermal conductivity coefficient, partial pressure of saturated water vapour, moist condition

*Acknowledgements:* The author acknowledges the scientific consulting work of V.T. Erofeev, a full member of the Russian Academy on Architecture and Construction Sciences.

**FOR CITATION:** Elchishcheva T.F. Safe usage of external enclosures under adverse environmental exposure. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14(5):570-588. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.5.570-588 (rus.).

## ВВЕДЕНИЕ

Жизненный цикл здания содержит все этапы его существования — от замысла, проектирования, возведения и эксплуатации до последующей утилизации и вторичного использования строительных материалов. На всех этих этапах должна быть обеспечена безопасная эксплуатация здания, исключающая отказы конструкций по всем видам заявленных качеств. Безопасность среды жизнедеятельности человека в сфере строительства и эксплуатации зданий включает, наряду с другими видами безопасности, термическую, биологическую и механическую безопасности.

Одной из важных задач, которая должна быть решена для обеспечения этих видов безопасности, является разработка конструктивных решений наружных ограждающих конструкций, обладающих высокими показателями долговечности, энергоэффективности (теплозащитных качеств) и эксплуатационных свойств. При этом также решаются задачи энерго- и ресурсосбережения [1–5] как при производстве строительных материалов, так и при возведении и эксплуатации зданий.

Однако в ряде случаев изменяются изначально заложенные в расчетах свойства строительных материалов, предназначенных для возведения наружных ограждающих конструкций. Изменяются эксплуатационные характеристики наружных ограждающих конструкций (причина — несоблюдение термической и механической безопасности), внешний вид конструкций, цвет и текстура строи-

тельных материалов [6] (причина — несоблюдение требований биологической безопасности). Такие проявления часто связаны с неблагоприятным воздействием окружающей среды [6–30] и накоплением в материалах ограждающих конструкций неорганических гигроскопических солей, когда возникает в том числе деструкция строительных материалов [7, 8, 30–38].

Неорганические гигроскопические соли — это вещества весьма распространенные в природе и промышленном производстве. Известны несколько источников попадания солей в материал наружных ограждающих конструкций:

- окружающая среда, включающая атмосферный воздух, осадки, почву [30];
- исходное сырье для производства строительного материала — глина, шамот, песок [39];
- вяжущие вещества — цемент, гипс, известь [39];
- вода затворения с растворенными солями, не соответствующая требованиям стандартов<sup>1</sup>;
- противоморозные и другие технологические добавки для улучшения свойств бетонной или растворной смеси, которые не соответствуют нормативным требованиям по содержанию солей или оксидов (при пересчете соледержания на содержание оксидов) — оксида натрия ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), оксида калия ( $\text{K}_2\text{O}$ ), оксида магния ( $\text{MgO}$ ) и оксида серы ( $\text{SO}_3$ ), а также хлоридов ( $\text{Cl}^-$ ) [39], либо таких, до-

<sup>1</sup> ГОСТ 23732-2011. Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия. М. : Стандартинформ, 2012.

полнительным эффектом действия которых является появление высолов на конструкциях<sup>2</sup>.

Из окружающей среды в материал наружных стен соли попадают в виде растворов различных концентраций и парогазовоздушной смеси.

Растворы проникают в строительный материал стен из атмосферных и почвенных вод, куда попадают вследствие природных процессов и техногенных воздействий на окружающую среду. Также растворы проникают в толщу с поверхности строительного материала, где они образуются вследствие растворения взвешенных веществ — пыли или аэрозолей солей с частицами диаметром от 0,5 до 10 мкм, осевших на стены, во влаге наружного или внутреннего воздуха. Поступают растворы в строительные материалы за счет диффузии из-за перепада температур и разницы давления наружного воздуха и внутреннего воздуха помещения.

Парогазовоздушная смесь проникает в строительный материал за счет диффузии на глубину от 50 до 100 мм в бетоны низкой плотности и глубину от 10 до 20 мм — в плотные бетоны [31].

Засоленный строительный материал во всем диапазоне температур, которые могут наблюдаться в наружной ограждающей конструкции за годовой период, можно рассматривать как систему, состоящую из следующих компонентов — «скелет» (плотное вещество) материала, парогазовоздушная смесь, растворы солей, кристаллы солей, лед. В такой системе могут быть разные массовые и объемные концентрации составляющих компонентов, которые, при одной и той же температуре отличаются для различных видов солей. Концентрация солевых растворов зависит от температуры системы и влаго содержания и определяется расчетными методами, принятыми в аналитической химии, и по таблицам или диаграммам растворимости водно-солевых систем.

Величина гигроскопической точки соли определяет вид фазового состояния влаги и соли в поровом пространстве строительного материала:

- когда относительная влажность воздуха меньше величины гигроскопической точки соли, сорбционная влага состоит из влаги полимолекулярных слоев на поверхности пор и капилляров и включает капиллярно-конденсированную или полимолекулярно-адсорбированную жидкость [40] и влагу водно-солевых комплексов на поверхности кристаллов солей;

- когда относительная влажность воздуха выше гигроскопической точки соли, на внутренней поверхности стенок пор и капилляров строительного

<sup>2</sup> ГОСТ 24211-2008. Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия (с Изменением № 1) (с Поправкой). М. : Стандартинформ, 2010.

материала выпадает конденсат, растворяющий кристаллическую соль. При этом в поровом пространстве образуются растворы солей;

- когда относительная влажность воздуха меньше гигроскопической точки соли, если последняя больше 85 % из-за капиллярной конденсации и образования в порах жидкой влаги [41].

Часть сорбционной влаги, взаимодействуя со скелетом материала, становится «связанной» со свойствами, отличными от свойств «свободной» воды, и не входит в объем солевых растворов. Это вызвано тем, что структура «связанной» воды отличается особенностями фазового перехода вследствие влияния поверхности минеральных частиц строительного материала на молекулы воды [38].

Из растворов в виде твердой кристаллической фазы соли выпадают в следующих случаях:

- в процессе сушки наружных ограждающих конструкций, которая наблюдается практически весь годовой период и происходит в весенне-летний период при увеличении температуры наружного воздуха с внешней стороны наружных ограждающих конструкций; в осенне-зимний период при включении отопления и увеличении температуры внутреннего воздуха в помещении с внутренней стороны наружных ограждающих конструкций;

- при увеличении концентрации порового раствора соли до состояния насыщения и увеличении содержания твердой кристаллической фазы: вследствие дополнительного притока солей извне; снижения растворимости солей при понижении температуры строительного материала ограждающей конструкции, особенно ее наружного слоя, в зимний период;

- при метастабильности строительной системы здания из-за попеременного увлажнения и сушки, когда слоистая кирпичная кладка выполняется из строительных материалов с несбалансированными по отношению друг к другу капиллярно-пористыми свойствами и химическим составом [42].

Выпадающие из растворов соли образуют высолы на наружной и внутренней поверхностях, а также в толще ограждающих конструкций. Такие высолы можно условно разделить на первичные и вторичные [43].

Образование первичных высолов вызвано использованием при производстве строительных материалов сырья или воды затворения, которые не отвечают предельным нормам содержания солей, а также взаимодействием продукта гидратации цемента — гидроксида кальция  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  с углекислым газом воздуха в процессе твердения растворной или бетонной смеси. При этом происходит карбонизация материала — образование карбоната кальция  $\text{CaCO}_3$ , нерастворимого в воде, и появление белых

«выцветов» на поверхности кирпичной кладки или бетона.

Вторичные высолы образуются при эксплуатации здания и вызваны нарушением влажностного режима стен [44]; загрязнением строительных материалов веществами, содержащими пыль солей или оксидов; воздействием химических газов и аэрозолей. Происхождение таких загрязнителей может быть как природного, так и техногенного характера.

Загрязнители не только участвуют в фазовых превращениях внутривещного вещества, но и вступают во взаимодействие с его составляющими и веществами, входящими в «скелет» строительного материала. Происходящие при этом химические реакции замещения нарушают структуру «скелета» и вызывают его разрушение.

Соли, выпадающие из растворов, делятся на безводные соли (без присоединенных к молекуле соли молекул воды) и кристаллогидраты (молекулы соли, которые содержат в своем составе химически связанную воду). Один и тот же вид соли, в зависимости от температуры среды, может образовывать при соединении с водой кристаллогидраты с разным числом присоединенных к молекуле соли молекул воды. Из-за низкой плотности кристаллогидрата его объем больше объема безводной соли, поэтому кристаллогидрат может оказывать большее давление на стенки пор и капилляров, чем безводная соль. При этом в стенках пор материала возникает сначала напряжение, а при нарастающем давлении происходит их разрушение — разрушается «скелет» строительного материала.

Химический анализ позволяет определить содержание солей в строительном материале. Установлено, что среднее солесодержание составляет около 12 % по массе [45].

Анализ публикаций, посвященных изучению воздействия солей на строительные материалы наружных ограждающих конструкций зданий, показывает, что соли влияют на сорбционное влагосодержание, паропроницаемость, теплопроводность и теплопроводность строительных материалов. Процесс соленакопления в ограждающих конструкциях практически необратим, и при высоком засолении происходит нарушение их безопасной эксплуатации и отказы по влагосодержанию, паропроницаемости и термическому сопротивлению, которые связаны с усилением гигроскопических свойств строительных материалов при засолении, приводящем к увеличению сорбционного влагосодержания. Сорбционные свойства материала (поглощение парообразной влаги из окружающей среды) усиливаются при наличии в материале гигроскопических солей вследствие понижения давления насыщенных паров воды над раствором соли

по сравнению с давлением паров над водой. Сорбирование влаги строительным материалом и разбавление порового солевого раствора продолжаются до тех пор, пока в поровом пространстве стенового материала установится такое же давление пара, как в окружающем воздухе. Повышение сорбционной активности строительных материалов по причине засоления может привести к образованию конденсата, диффундирующего сквозь толщу наружной ограждающей конструкции и вызывающего ее переувлажнение, способствует развитию объемных зон повышенного влагосодержания на поверхности и внутри ограждающих конструкций. Это приводит к ухудшению санитарного состояния ограждающих конструкций и помещений здания, развитию биозагрязнений — плесени, зеленых водорослей и грибов. Все вышеперечисленное приводит к отказам ограждающих конструкций по тепло-, влаго- и биозащитным качествам и снижает прочность ограждающих конструкций. Таким образом, на эксплуатационные качества наружных ограждающих конструкций соли оказывают влияние как в твердой фазе, так и в виде растворов.

Анализ литературных источников показал, что достаточно полно изучены вопросы влияния лишь некоторых хлоридов на паропроницаемость, теплопроводность, теплопроводность и сорбционное влагосодержание строительных материалов. Так, изучению сорбционных свойств материалов, засоленных хлоридами калия, кальция, магния и натрия, посвящены работы В.И. Бареева, А.М. Берегового, Н.А. Чайки, О.В. Дегтярева, В.А. Обьедкова [31–34, 46, 47]; засоленных некоторыми фосфорными солями и смесью фосфата натрия и карбоната натрия — исследование Н.В. Кузнецовой [48]. Авторами в результате экспериментов было установлено, что химический состав солей, их количество и гигроскопические свойства влияют на сорбционную влажность строительных материалов. Наличие в материале солей с более низкими гигроскопическими точками, а также увеличение массового солесодержания вызывают повышение сорбционной влажности строительных материалов.

Паропроницаемости засоленных материалов дана оценка в трудах В.И. Бареева, Н.А. Чайки, С.А. Сержечкиной, О.В. Дегтярева, В.А. Езерского, [31, 34, 35, 46, 49]. Авторами было установлено изменение паропроницаемости строительных материалов, содержащих соли.

Для глиняного кирпича плотностью  $1800 \text{ кг/м}^3$ , керамзитобетона плотностью  $1200 \text{ кг/м}^3$  и цементно-песчаного раствора плотностью  $1800 \text{ кг/м}^3$  В.А. Езерским на основе экспериментально-статистического подхода получена зависимость сорбционного влагосодержания строительных материалов от относи-

тельной влажности воздуха и массового содержания в солевой смеси хлоридов натрия, калия и магния в разных соотношениях. Выявлено существенное влияние состава смеси и относительной влажности воздуха на сорбционное влагосодержание строительного материала. Получена зависимость сорбционного влагосодержания глиняного кирпича от массовых долей хлоридов в солевой смеси при относительной влажности воздуха 80 и 98 % и содержании солей 0,5 и 2,0 % по массе.

А.М. Береговой и В.А. Береговой [50] установили, что при наличии в строительном материале кристаллогидрата  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  в количестве, не превышающем 0,02 мг на 1 см<sup>2</sup> поверхности ограждающей конструкции, влажность засоленных образцов ниже, чем в контрольной группе образцов. Соли  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CaBr}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$  и  $\text{NaBr} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  в количестве 10 мг на 1 см<sup>2</sup> поверхности ограждающей конструкции и испытании в климатической камере при отрицательных температурах вызывают рост влагосодержания строительного материала в 1,27–2,0 раза.

Исследование влияния солей на теплофизические свойства проведено лишь для некоторых конструктивных строительных материалов и утеплителей, содержащих отдельные соли, при нескольких фиксированных значениях температуры.

В работе В.А. Обьедкова [51] приведены результаты экспериментов по методу стационарного теплового потока на приборе Бока влияния на коэффициент теплопроводности  $\lambda$  газосиликата плотностью 600 кг/м<sup>3</sup> раствора хлорида натрия концентрацией от 0,5 до 3,5 % по массе при влажности образцов от 0 до 30 % по массе. Эксперименты послужили основой для построения математической модели, расчеты на которой показали существенное влияние на  $\lambda$  влагосодержания. Значимого влияния солесодержания не было выявлено ни для влажного, ни для сухого материала.

На приборе Бока И.Н. Бондаренко, Е.В. Тарыниной и А.И. Бондаренко экспериментально исследовался  $\lambda$  керамзитобетона влажностью от 0 до 23 % по массе, содержащего растворы хлорида калия концентрацией 5–10 % по массе [36]. Зависимости коэффициента теплопроводности от солесодержания авторами не было выявлено.

Очевидно, полученные авторами [36, 51] результаты связаны с низким солесодержанием исследуемых образцов и их сушкой, которая происходит за время выхода прибора на стационарный тепловой режим (1,5–2,5 часа) перед определением коэффициента теплопроводности. Данные А.В. Лыкова [52, 53] свидетельствуют о том, что такие приборы не должны применяться для определения теплопроводности увлажненных материалов, так как в резуль-

таты опытов вносятся существенные погрешности. В случае экспериментов с засоленными влажными материалами указанные погрешности обусловлены не только переносом влаги, но также миграцией солей и их фазовыми превращениями во время сушки. При этом возникает «эффект Соре», заключающийся в появлении в образце вследствие градиента температур градиента концентрации компонентов, возникает термодиффузия ионов солей от разогретого участка образца к холодному, что приводит к образованию высолов на гранях образцов. Указанные погрешности метода не позволяют выявить влияние солесодержания на коэффициент теплопроводности строительных материалов.

В работе А.М. Берегового и В.А. Берегового [50] авторами определены коэффициенты теплопроводности материала конструкции в зонах сверхсорбционного увлажнения и промерзания при наличии гигроскопических солей. Установлено, что коэффициент теплопроводности засоленного материала увеличивается в среднем в 1,15 раз. Увеличение коэффициента теплопроводности авторы связывают с ростом влагосодержания строительного материала при увеличении в нем количества соли.

В статье [50] приводится приближенная оценка тепловых потерь из-за засоления ограждающих конструкций с учетом только промерзания, которая определяется по [54], а также совместного влияния промерзания и солей. Полученные результаты расчета авторы сравнивали с общепринятой методикой расчета без учета промерзания и солевого воздействия по СП 50.13330.2012<sup>3</sup>. Установлено, что при учете только промерзания материала тепловые потери через ограждающие конструкции выше нормативных значений на 11–12 %, наличие гигроскопической соли увеличивает теплотери до 13–17 % и снижает показатель энергетической эффективности здания.

Таким образом, обзор литературных источников показывает, что остается неисследованным влияние большинства солей на теплопроводность каменных строительных материалов и утеплителей и актуально изучение влияния солей на теплофизические свойства материалов наружных ограждающих конструкций, исключающее ошибки, возникающие при замерах коэффициента теплопроводности приборами на основе стационарного теплового режима.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Проведенное исследование включало общепризнанные методики лабораторных исследований

<sup>3</sup> СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. М. : Минрегион РФ, 2012.

и статистической обработки результатов экспериментальных данных. Методика лабораторного изучения включала подготовку опытных образцов строительных материалов, их засоление и замеры коэффициента теплопроводности образцов на разработанной установке по методу нестационарного теплового режима.

В качестве строительных материалов были выбраны пять строительных материалов, применяющихся в качестве конструктивных, конструктивно-теплоизоляционных и теплоизоляционных в наружных ограждающих конструкциях. Исследовались кирпич силикатный автоклавный плотностью 1800 кг/м<sup>3</sup>, кирпич керамический плотностью 1800 кг/м<sup>3</sup>, пеносиликат автоклавный плотностью 650 кг/м<sup>3</sup>, арболит плотностью 616 кг/м<sup>3</sup> и минераловатные плиты плотностью 150 кг/м<sup>3</sup>.

Для изучения подготавливались образцы строительных материалов в виде кубов. Размеры кубов определялись номенклатурой строительных материалов, в качестве длины ребра куба принимался наименьший размер изделия: для силикатного кирпича и пеносиликата — 80 мм; керамического кирпича — 65 мм; арболита — 100 мм; минераловатных плит — 60 мм.

Для засоления в каждый образец строительного материала вводился разбавленный раствор соли, объем которого складывался из объема насыщенного раствора соли и дистиллированной воды, которая добавлялась для обеспечения необходимого уровня содержания влаги в материале и равномерности распределения раствора соли по объему образца [49]. Разбавлялись насыщенные растворы следующих химически чистых солей марки ХЧ: хлорида натрия с содержанием соли по массе  $m_c = 26,416\%$  и плотностью раствора  $\rho_p = 1,196\text{ г/см}^3$ ; сульфата калия с  $m_c = 9,99\%$  и  $\rho_p = 1,010\text{ г/см}^3$ ; хлорида кальция с  $m_c = 42,69\%$  и  $\rho_p = 1,515\text{ г/см}^3$ . После засоления образцы выдерживались в течение 10 дней под непроницаемой пленкой и периодически переворачивались. Была изготовлена серия образцов каждого исследуемого материала — по три образца для каждого уровня солесодержания и каждого уровня влагосодержания.

Серия контрольных «чистых» образцов представляла собой группу из трех образцов материала для каждого принятого уровня влагосодержания. Максимальное значение влагосодержания принималось с учетом предельно допустимого приращения расчетного массового отношения влаги в строительном материале к концу периода влагонакопления  $\Delta\omega_{cp},\%$  по массе, для условий эксплуатации наружных ограждающих конструкций Б (в соответствии с СП 50.13330.2012<sup>3</sup>) и составляло, соответственно, для кирпича силикатного — 6,0 % по массе; кирпи-

ча керамического — 3,5 % по массе; пеносиликата — 18,0 % по массе; арболита — 22,5 % по массе; минераловатных плит — 8,0 % по массе.

Промежуточные уровни влагосодержания принимались: для кирпича силикатного — 2,0 и 4,0 % по массе; кирпича керамического — 1,0 и 2,0 % по массе; пеносиликата — 6,0 и 12,0 % по массе; арболита — 7,5 и 15,0 % по массе; минераловатных плит — 2,0 и 5,0 % по массе.

Уровни солесодержания принимались равными следующим значениям: для кирпича силикатного и кирпича керамического — 1,5, 3,0 и 4,5 % по массе; пеносиликата — 2, 4 и 6 % по массе; арболита — 2, 4, 8 и 12 % по массе; минераловатных плит — 4 и 8 % по массе.

Физико-химическое исследование проб строительных материалов выполнялось методами стандартных химических анализов. Массовое содержание влаги в материалах  $\omega, \%$ , определялось в соответствии с ГОСТ 12730.2-78 (2007)<sup>4</sup>. Содержание хлорида натрия — методом ионометрического титрования. Содержание сульфата натрия и сульфата калия устанавливалось нефелометрическим методом путем измерения интенсивности света, рассеянного дисперсными системами.

В соответствии с рекомендациями, данными в трудах А.В. Лыкова, о недопустимости использования для замеров коэффициента теплопроводности увлажненных материалов приборов, работающих на основе стационарного теплового режима [52, 53], коэффициент теплопроводности увлажненных и засоленных строительных материалов замерялся на разработанной опытной установке для определения теплофизических характеристик материалов нестационарным импульсным методом с использованием линейного источника тепла [55]. Это исключило сушку образцов и фазовые превращения солей и влаги в поровом пространстве и на поверхности строительных материалов, так как время одного опыта составляло от 1 до 5 мин. Нестационарный импульсный метод дает возможность определять коэффициент теплопроводности строительных материалов двумя способами — температурно-временных интервалов и по максимуму избыточной температуры.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В лабораторных условиях на разработанной опытной установке [55] изучалось влияние хлорида натрия NaCl на коэффициент теплопроводности образцов силикатного кирпича, керамического кир-

<sup>4</sup> ГОСТ 12730.2-78. Бетоны. Метод определения влажности. М. : Стандартинформ, 2007.

пича, пеносиликата и арболита. На коэффициент теплопроводности минераловатных плит изучалось влияние сульфата калия  $K_2SO_4$  и хлорида кальция  $CaCl_2$  [56]. Для строительных материалов и гигроскопических солей определялась зависимость коэффициента теплопроводности  $\lambda$  от солесодержания материалов  $c$ , % по массе, и влагосодержания  $\omega$ , % по массе.

Сравнение коэффициента теплопроводности засоленных образцов производилось с серией контрольных «чистых» образцов без соли, для которых исследование коэффициента теплопроводности проводилось на трех образцах для каждого назначенного уровня влагосодержания.

Установлены следующие средние значения коэффициента теплопроводности строительных материалов по результатам испытаний трех образцов для каждого уровня соле- и влагосодержания, представленные в табл. 1.

Для значения уровня фактора «солесодержание»  $c = 0$  экспериментальные значения  $\lambda$  увлажненных материалов сравнивались по среднему значению трех испытаний для каждого из трех образцов. Статистический анализ показал, что имеется разброс значений  $\lambda$  по результатам испытаний образцов строительных материалов при одинаковых значениях влагосодержания. Вычислялись средние значения отдельных опытов для каждого уровня влагосодержания  $x_j$ , их дисперсии  $S_j^2$  и среднее квадратичное отклонение  $S$ . Нулевая гипотеза об однородности дисперсий отдельных групп нормально распределенных совокупностей проверялась по наблюдаемому значению критерия Кохрена  $G_{\text{набл}}$  [56]. Для  $c = 0$  при числе выборочных дисперсий  $N = 4$ , числе степеней свободы каждой дисперсии  $f = 2$  и уровне значимости  $\alpha = 0,05$ ,  $G_{\text{набл}}$  оказалось равным: для силикатного кирпича — 0,3345, керамического кирпича — 0,4021, пеносиликата — 0,4354, арболита — 0,4539, минераловатных плит — 0,3912. Критическая точка соответствует  $G_{\text{кр}} = 0,7679$ . Так как для всех строительных материалов  $G_{\text{набл}} < G_{\text{кр}}$ , то дисперсии можно было считать однородными. При выявленной однородности дисперсий отдельных опытов для общей оценки дисперсии воспроизводимости результатов экспериментов принималось среднее арифметическое значение дисперсий отдельных уровней  $S_{\{x\}}^2$  и среднее квадратичное отклонение  $S_{\{x\}}$ . При уровне  $c = 0$  для силикатного кирпича  $S_{\{x\}}^2 = 1,26 \cdot 10^{-2}$ , для керамического кирпича  $S_{\{x\}}^2 = 1,8 \cdot 10^{-3}$ , для пеносиликата  $S_{\{x\}}^2 = 3,07 \cdot 10^{-4}$ , для арболита  $S_{\{x\}}^2 = 4,41 \cdot 10^{-5}$ , для минераловатных плит  $S_{\{x\}}^2 = 3,27 \cdot 10^{-6}$ . Среднеквадратичное отклонение составило: для силикатного кирпича  $S_{\{x\}} = 1,12 \cdot 10^{-1}$ , для керамического кирпича  $S_{\{x\}} = 4,25 \cdot 10^{-2}$ , для пеносиликата  $S_{\{x\}} = 1,75 \cdot 10^{-2}$ ,

для арболита  $S_{\{x\}} = 6,64 \cdot 10^{-3}$ , для минераловатных плит  $S_{\{x\}} = 1,57 \cdot 10^{-3}$ .

Доверительный интервал определялся по известным формулам математической статистики для каждого значения влагосодержания с учетом вычисленной точности оценки [56].

При засолении материалов также рассчитывались значения  $G_{\text{набл}}$  и  $G_{\text{кр}}$  при  $f = 2$ ,  $\alpha = 0,05$  и следующих значениях  $N$ : для силикатного кирпича, керамического кирпича и пеносиликата —  $N = 12$ ; для арболита —  $N = 16$ ; для минераловатных плит —  $N = 8$ . Величина  $G_{\text{кр}}$  составила: для силикатного кирпича, керамического кирпича и пеносиликата —  $G_{\text{кр}} = 0,3924$ ; для арболита —  $G_{\text{кр}} = 0,3218$ ; для минераловатных плит —  $G_{\text{кр}} = 0,5157$ . Наблюдаемое значение критерия Кохрена  $G_{\text{набл}}$  оказалось равным: для силикатного кирпича — 0,1619; керамического кирпича — 0,1252; пеносиликата — 0,3380; арболита — 0,1399; минераловатных плит, содержащих  $K_2SO_4$  — 0,4820; минераловатных плит, содержащих  $CaCl_2$  — 0,2874. Наблюдаемые значения критерия Кохрена оказались меньше критических значений для каждого исследуемого засоленного материала, и во всех случаях отмечалась однородность дисперсий отдельных опытов определения коэффициента теплопроводности.

Оценка полученных в результате эксперимента значений  $\lambda$  проводилась путем сравнения  $\lambda$  незасоленного пеносиликата со значениями  $\lambda$  близких по свойствам незасоленных строительных материалов по результатам исследований авторов: Н.И. Сабалюскаса и Б.Н. Кауфмана [57] для газосиликата плотностью 700 кг/м<sup>3</sup>; А.Ф. Гаевого и Б.А. Качуры [57] для газосиликата плотностью 650 кг/м<sup>3</sup>; Каммерера [58] для ячеистого бетона плотностью 600 кг/м<sup>3</sup> на грубом кварцевом песке; со значениями  $\lambda$  по интерполяции данных СП 50.13330.2012<sup>3</sup>; с результатами аналитического расчета коэффициента теплопроводности увлажненного материала  $\lambda_\omega$  по формуле (1) В.М. Ильинского [59] и формуле (2) А. Миснара [58].

$$\lambda_\omega = \lambda_0 + \beta\omega, \quad (1)$$

$$\lambda_\omega = \lambda_0(1 + 0,08\omega), \quad (2)$$

где  $\lambda_0$  — коэффициент теплопроводности сухого материала;  $\beta$  — эмпирический коэффициент. Для пенобетонов принимается  $\beta = 0,011$ . Результаты выполненного сравнения представлены в табл. 2 и на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что рассчитанные по формулам и определенные экспериментально значения  $\lambda$  укладываются в доверительный интервал определения  $\lambda$  на экспериментальной установке при влагосодержании материалов до 8 % по массе. Наиболее близко к полученным экспериментальным ре-

**Табл. 1.** Коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , Вт/(м·°С), засоленных строительных материалов по результатам эксперимента при различных уровнях влаго- и соледержания, % по массе

**Table 1.** Thermal conductivity coefficient  $\lambda$ , W/(m·°C), of saline construction materials according to the experimental results at various levels of moisture and salt content, mass %

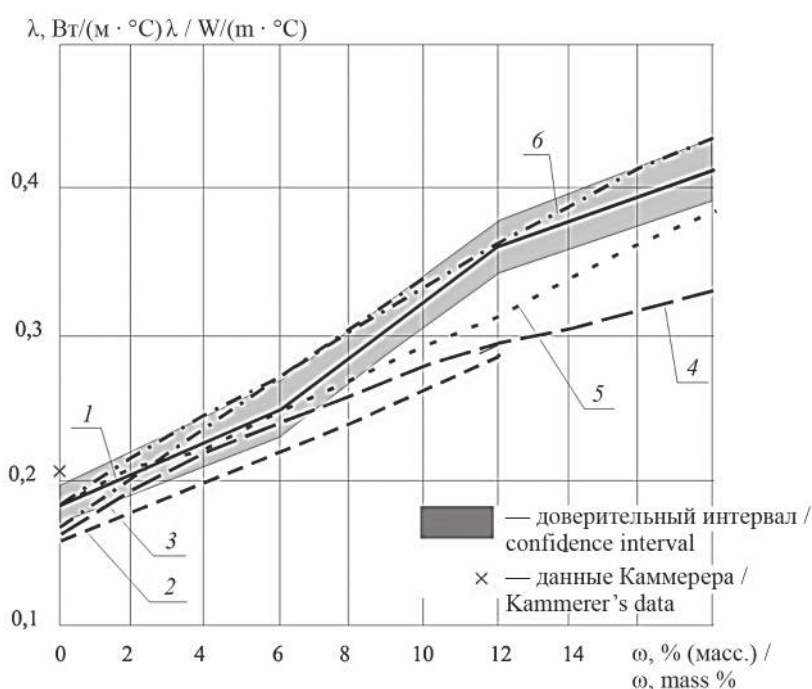
Вид соли и уровни соледержания $c$ , % по массе / Type of salt and salinity levels $c$ , mass %	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·°С), при уровнях влагосодержания $\omega$ , % по массе / Thermal conductivity coefficient $\lambda$ , W/(m·°C), at moisture content levels $\omega$ , mass %			
Силикатный кирпич / Lime-and-sand brick				
NaCl	0	2,0	4,0	6,0
0	0,6994	0,9876	1,2346	1,3580
1,5	1,0291	1,3453	0,9998	1,1590
3,0	1,0891	1,0088	1,1912	1,4599
4,5	1,3276	1,3109	1,1731	1,5927
Керамический кирпич / Burnt brick				
NaCl	0	1,0	2,0	3,5
0	0,5509	0,7465	0,7465	0,8502
1,5	0,5775	0,7978	0,8545	0,8967
3,0	0,5982	0,8468	0,8939	0,9440
4,5	0,6225	0,8937	0,9631	0,9982
Пеносиликат / Foamed silicate				
NaCl	0	6,0	12,0	18,0
0	0,1839	0,2500	0,3600	0,4100
2,0	0,2103	0,2620	0,3600	0,3800
4,0	0,2380	0,2810	0,3450	0,3786
6,0	0,2510	0,3010	0,3650	0,3710
Арболит / Wood concrete				
NaCl	0	7,5	15,0	22,5
0	0,1085	0,1465	0,1841	0,2201
2,0	0,1172	0,1560	0,1761	0,2007
4,0	0,1302	0,1795	0,1984	0,2037
8,0	0,1568	0,2183	0,2172	0,2068
12,0	0,1834	0,2243	0,2207	0,2166
Минераловатные плиты / Mineral wool slabs				
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0	2,0	5,0	8,0
0	0,0499	0,0539	0,0768	0,1014
4,0	0,0530	0,0535	0,0820	0,1082
8,0	0,0548	0,0555	0,0860	0,1100
Минераловатные плиты / Mineral wool slabs				
CaCl <sub>2</sub>	0	2,0	5,0	8,0
0	0,0499	0,0539	0,0768	0,1014
4,0	0,0520	0,0518	0,0615	0,0800
8,0	0,0530	0,0540	0,0650	0,0713



**Табл. 2.** Сравнение величины коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , Вт/(м·°С), незасоленного пеносиликата плотностью 650 кг/м<sup>3</sup> с коэффициентами теплопроводности близких по характеристикам материалов по данным различных источников

**Table 2.** Comparison of thermal conductivity coefficient  $\lambda$ , W/(m·°C), of a non-saline foamed silicate with density of 650 kg/m<sup>3</sup> with thermal conductivity coefficients of materials similar in their properties according to various sources

Источник информации / Source of information	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·°С), при влагосодержании $\omega$ , % по массе / Thermal conductivity coefficient $\lambda$ , W/(m·°C), at moisture content $\omega$ , mass %									
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
Импульсный метод [55] / Impulse method [55]	0,1839	0,2200	0,2300	0,2500	0,2800	0,3200	0,3600	0,3800	0,3949	0,4100
СП 50.13330.2012 <sup>3</sup> / SP 50.13330.2012 <sup>3</sup>	0,1575	—	—	—	0,2475	—	0,2875	—	—	—
Н.И. Сабаляускас и Б.Н. Кауфман [57] / N.I. Sabalyauskas and B.N. Kaufman [57]	0,1700	—	—	—	—	0,3400	—	—	—	—
А.Ф. Гаевой и Б.А. Качура [57] / A.F. Gaevoy and B.A. Kachura [57]	0,1600	0,1950	0,2200	0,2400	0,2600	0,2800	0,2900	0,3050	0,3200	0,3300
Каммерер [58] / Kammerer [58]	0,2075	—	—	—	—	—	—	—	—	—
В.М. Ильинский [59] / V.M. Ilyinsky [59]	0,1839	0,2059	0,2279	0,2499	0,2719	0,2939	0,3159	0,3379	0,3599	0,3819
А. Миснар [58] / A. Misnar [58]	0,1839	0,2133	0,2427	0,2722	0,3016	0,3310	0,3604	0,3899	0,4193	0,4487



**Рис. 1.** Коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , Вт/(м·°С), близких по свойствам незасоленных строительных материалов при влагосодержании  $\omega$ , % (масс.): 1 — пеносиликат плотностью 650 кг/м<sup>3</sup> по результатам эксперимента; 2 — то же, по интерполяции данных СП 50.13330.2012<sup>3</sup>; 3 — данные Н.И. Сабаляускаса и Б.Н. Кауфмана; 4 — данные А.Ф. Гаевой и Б.А. Качуры; 5 — расчет по формуле В.М. Ильинского; 6 — расчет по формуле А. Миснара

**Fig. 1.** Thermal conductivity coefficient  $\lambda$ , W/(m·°C), of non-saline construction materials with similar properties and moisture content  $\omega$ , mass %: 1 — foamed silicate with density of 650 kg/m<sup>3</sup> according to the experimental results; 2 — ditto, according to the interpolation of SP 50.13330.2012<sup>3</sup> data; 3 — data of N.I. Sabalyauskas and B.N. Kaufman; 4 — data of A.F. Gaevoy and B.A. Kachura; 5 — calculation according to the formula by V.M. Ilyinsky; 6 — calculation according to the formula by A. Misnar

зультатам расположены данные Н.И. Сабаляускаса и Б.Н. Кауфмана и результаты расчета по формулам В.М. Ильинского (1) и А. Миснара (2). При влагосодержании материала свыше 8 % по массе из доверительного интервала выходят значения  $\lambda$ , определенные по формуле В.М. Ильинского (1), данные СП 50.13330.2012<sup>3</sup> и А.Ф. Гаевого и Б.А. Качуры. Это объясняется разницей в плотности, качественном составе и структурном строении исследуемых материалов, а также различием методов определения  $\lambda$ . При этом отклонение расчетов по формуле (1) с экспериментальными данными составляет: максимальное — 14 % (отн.) при  $\omega = 12$  % (масс.), минимальное — 0,04 % (отн.) при  $\omega = 6$  % (масс.), среднее — 6,24 % (отн.). Расчеты по формуле (2) наиболее точно описывают изменение коэффициента теплопроводности в зависимости от влагосодержания и на всем интервале влагосодержания укладываются в доверительный интервал определения  $\lambda$  на экспериментальной установке.

Результаты повышения (со знаком «+») или понижения (со знаком «-») средних значений коэффициента теплопроводности засоленных увлажненных строительных материалов по сравнению с увлажненными материалами, не содержащими соли, для каждого уровня соле- и влагосодержания, выраженные в % (отн.), продемонстрированы в табл. 3.

Предварительный анализ результатов экспериментального исследования (табл. 3) показал, что засоление при изменении влажности строительных материалов оказывает сложное влияние на величину коэффициента теплопроводности. Количество влаги определяет фазовое состояние солей в поровом пространстве строительного материала, его изменение и влияет на изменение  $\lambda$ . Однако данные об изменении (увеличении или уменьшении) коэффициента теплопроводности при изменении влагосодержания не дают представления о значимости влияния соле-содержания на  $\lambda$ .

Поэтому для оценки значимости влияния фактора «солесодержание» на коэффициент теплопроводности материалов при различных значениях влагосодержания проводился однофакторный дисперсионный анализ результатов лабораторного эксперимента. Когда фактор «солесодержание» оказывает значимое влияние на коэффициент теплопроводности исследуемых материалов, группа наблюдаемых значений признака  $\lambda$  на одном уровне солесодержания должна отличаться от групп наблюдений на других уровнях. Следовательно, должны различаться и групповые средние, которые тем больше рассеяны вокруг общей средней, чем больше влияние фактора, поэтому различаются факторная  $s_{\text{факт}}^2$  и остаточная  $s_{\text{ост}}^2$  дисперсии.

В случае, когда фактор «солесодержание» не оказывал влияние на  $\lambda$ , и теплопроводность засоленного материала не отличалась значимо от  $\lambda$  материала, не содержащего соль, то факторная и остаточная дисперсии являлись несмещенными оценками общей дисперсии и различались незначимо. Поэтому сравнение факторной и остаточной дисперсий по критерию Фишера – Снедекора (критерию  $F$ ) показывало справедливость (или несправедливость) нулевой гипотезы  $H_0$  об их равенстве и значимости (или незначимости) влияния фактора «солесодержание» на коэффициент теплопроводности строительных материалов. Однофакторный дисперсионный анализ позволяет выявить неравенство эффектов по крайней мере двух уровней исследуемого фактора. Наблюдаемое значение критерия  $F$  определялось по формуле:

$$F_{\text{набл}} = s_{\text{факт}}^2 / s_{\text{ост}}^2. \quad (3)$$

Критическая точка  $F_{\text{кр}}$  определялась при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ , числе степеней свободы факторной дисперсии, равной  $p - 1$  и числе степеней свободы остаточной дисперсии, равной  $p(n - 1)$ . При этом  $p$  — число уровней фактора «солесодержание». Когда выполнялось неравенство  $F_{\text{набл}} > F_{\text{кр}}$  принималось, что фактор «солесодержание» оказывает значимое влияние на  $\lambda$  (значение  $F_{\text{кр}}$  определялось по справочным таблицам).

Проведенный однофакторный дисперсионный анализ позволил установить, что назначенные уровни солесодержания оказывают значимое влияние на коэффициент теплопроводности: для силикатного кирпича — при уровнях влагосодержания 0 и 2 % по массе, для керамического кирпича — все назначенные уровни влагосодержания, для пеносиликата — уровни влагосодержания 0 и 6 % по массе, для арболита — уровни влагосодержания 0; 7,5 и 15 % по массе. Для минераловатных плит назначенные уровни солесодержания не оказывают значимого влияния на  $\lambda$  при всех уровнях влагосодержания.

Полученные результаты позволили подтвердить методами математической статистики, что солесодержание оказывает значимое влияние на  $\lambda$ , а результаты, полученные при использовании для определения  $\lambda$  приборов на основе стационарного теплового режима [36, 51], не могут быть использованы для определения коэффициента теплопроводности засоленных и увлажненных строительных материалов.

Таким образом, при определенных для каждого строительного материала значениях влагосодержания фактор «солесодержание» может не оказывать значимого влияния на коэффициент теплопроводности. Это связано с тем, что при высоком влагосодержании в поровом пространстве материала

**Табл. 3.** Изменение средних значений коэффициента теплопроводности засоленных строительных материалов по сравнению с увлажненными материалами, не содержащими соли, % (отн.), по результатам эксперимента при различных уровнях влаго- и солесодержания, % по массе

**Table 3.** Change in average values of thermal conductivity coefficient of saline construction materials compared to wetted non-saline materials, % (rel.), according to the experimental results at different levels of moisture and salt content, mass %

Вид соли и уровни солесодержания $c$ , % по массе / Type of salt and salinity levels $c$ , mass %	Изменение средних значений коэффициента теплопроводности засоленных строительных материалов по сравнению с увлажненными материалами, не содержащими соли, % (отн.), при уровнях влагосодержания $\omega$ , % по массе / Change in average values of thermal conductivity of saline construction materials compared to wetted non-saline materials, % (rel.), at moisture content levels $\omega$ , mass %			
Силикатный кирпич / Lime-and-sand brick				
NaCl	0	2,0	4,0	6,0
1,5	+47,14	+36,22	-19,02	-14,65
3,0	+55,72	+2,15	-3,52	+7,50
4,5	+89,82	+32,74	-4,98	+17,28
Керамический кирпич / Burnt brick				
NaCl	0	1,0	2,0	3,5
1,5	+4,83	+6,87	+6,95	+5,47
3,0	+8,59	+13,44	+11,88	+11,03
4,5	+13,00	+19,72	+20,54	+17,41
Пеносиликат / Foamed silicate				
NaCl	0	6,0	12,0	18,0
2,0	+14,36	+4,8	0	-7,32
4,0	+29,42	+12,40	-4,17	-7,66
6,0	+36,49	+20,40	+1,39	-9,51
Арболит / Wood concrete				
NaCl	0	7,5	15,0	22,5
2,0	+8,02	+6,48	-4,35	-8,81
4,0	+20,00	+22,53	+7,77	-7,45
8,0	+44,52	+49,01	+17,98	-6,04
12,0	+69,03	+53,11	+19,88	-1,59
Минераловатные плиты / Mineral wool slabs				
$K_2SO_4$	0	2,0	5,0	8,0
4,0	+6,21	-0,74	+6,77	+6,71
8,0	+9,82	+2,97	+11,98	+8,48
Минераловатные плиты / Mineral wool slabs				
$CaCl_2$	0	2,0	5,0	8,0
4,0	+4,21	-3,90	-19,92	-21,10
8,0	+6,21	+0,19	-15,36	-29,68

образуются растворы различной концентрации с коэффициентом теплопроводности более низким, чем  $\lambda$  солей в твердой фазе и  $\lambda$  поровой влаги.

Дисперсионный анализ позволил выявить неравенство эффектов, по крайней мере, двух уровней фактора «солесодержание», однако он не дает информацию о том, какие из уровней солесодержания оказывают значимое влияние на коэффициент те-

плопроводности строительного материала, а какие такого влияния не оказывают.

Для выявления, какие из уровней солесодержания оказывают значимое влияние на  $\lambda$ , проводился статистический анализ множественного сравнения выборочных средних значений  $\lambda$  (по методу Тьюки, Т-метод) засоленных строительных материалов, кроме значений  $\lambda$  минераловатных плит, так как для

этого материала назначенные при проведении эксперимента уровни соледержания не оказывали значимого влияния на  $\lambda$ .

T-метод показал, что соледержание значимо влияет на коэффициент теплопроводности исследуемых строительных материалов при различных сочетаниях для каждого из них уровней влаги и соледержания. Результаты анализа по T-методу представлены в табл. 4.

Использование для анализа T-метода дало возможность также установить значимость отличия величин коэффициентов теплопроводности материалов для фиксированных уровней влагосодержания при различных уровнях содержания соли.

Кристаллическая соль значимо повышает коэффициент теплопроводности материалов. Увеличение влагосодержания способствует растворению кристаллов солей в засоленном материале, что за-

медляет рост коэффициента теплопроводности вследствие понижения теплопроводности растворов солей и составляющей теплопередачи за счет диффузии паров воды над растворами по сравнению с диффузией паров над поровой влагой, не содержащей растворенных солей. Поэтому при определенных значениях влажности материалов некоторые соли могут не оказывать значимого влияния на повышение коэффициента теплопроводности.

Коэффициент теплопроводности строительных материалов используется в расчетах при назначении толщины наружных ограждающих конструкций и утеплителей (в случае многослойных ограждений). Было установлено, что  $\lambda$  строительного материала, содержащего гигроскопические соли, при влагосодержании, соответствующем условиям эксплуатации Б по СП 50.13330 2012<sup>3</sup>, может повышаться на величину до 80 % (отн.) в зависимости

**Табл. 4.** Результаты множественного сравнения выборочных средних значений коэффициента теплопроводности засоленных строительных материалов по результатам эксперимента при различных уровнях влаги- и соледержания, % по массе

**Table 4.** Results of the multiple comparison of sampling mean values of saline construction material thermal conductivity coefficient by the experimental results at various levels of moisture and salt content, mass %

Вид соли и уровни соледержания $c$ , % по массе / Type of salt and salinity levels $c$ , mass %	Вывод о значимости разности выборочных средних значений коэффициента теплопроводности строительных материалов при уровнях влагосодержания $\omega$ , % по массе / Conclusion on significance of difference in sampling mean values of construction material thermal conductivity coefficient at moisture content levels $\omega$ , mass %			
Силикатный кирпич / Lime-and-sand brick				
NaCl	0	2,0	4,0	6,0
1,5	значима / significant	—	—	—
3,0	значима / significant	значима / significant	—	—
4,5	значима / significant	значима / significant	—	—
Керамический кирпич / Burnt brick				
NaCl	0	1,0	2,0	3,5
1,5	—	значима / significant	значима / significant	—
3,0	значима / significant	значима / significant	значима / significant	значима / significant
4,5	значима / significant	значима / significant	значима / significant	значима / significant
Пеносиликат / Foamed silicate				
NaCl	0	6,0	12,0	18,0
2,0	—	—	—	—
4,0	значима / significant	значима / significant	—	—
6,0	значима / significant	значима / significant	—	—
Арболит / Wood concrete				
NaCl	0	7,5	15,0	22,5
2,0	—	—	—	—
4,0	значима / significant	значима / significant	—	—
8,0	значима / significant	значима / significant	—	—
12,0	значима / significant	значима / significant	значима / significant	—

от вида соли [44, 60]. Тогда толщину однослойной конструкции или слоя утеплителя следует увеличивать в 1,8 раза. Поэтому необходим учет солевого воздействия на теплопроводность строительных материалов, применяемых при проектировании наружных ограждающих конструкций зданий.

## ВЫВОДЫ

К перспективам развития данной темы следует отнести организацию учета наличия солей и их смесей в строительных материалах при проведении всех расчетов наружных ограждающих конструкций, где используются такие величины, как коэффициент паропроницаемости и коэффициент теплопроводности строительного материала, парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха, так как эти характеристики изменяются в присутствии солей.

Например, в СП 50.13330.2012<sup>3</sup> дается метод определения положения плоскости наибольшего увлажнения в ограждающих конструкциях с применением потенциала влажности [61–63], в формулу для определения которого входят коэффициенты паропроницаемости и теплопроводности, условное сопротивление теплопередаче и сопротивление паропроницанию ограждающей конструкции. При наличии солей требуется корректировка этих значений.

Результаты проведенной работы позволили сделать следующие выводы:

1. Наличие неорганических гигроскопических солей в поровом пространстве оказывает влияние на внешний вид, теплофизические свойства, сорбционное влагосодержание и прочностные качества строительных материалов. Изменение первоначальных свойств строительных материалов наружных ограждающих конструкций может нарушать требуемые параметры термической, биологической и механической безопасности зданий.

2. Теплофизические характеристики засоленных строительных материалов следует определять методами нестационарного теплового режима для исключения ошибок вследствие сушки образцов при стационарном режиме. Экспериментальные исследования позволили установить значимое влияние солей на коэффициент теплопроводности строительных материалов. Наличие в порах солей в виде кристаллов с более высоким коэффициентом теплопроводности по сравнению с теплопроводностью внутривещного вещества, повышает коэффициент теплопроводности строительных материалов. Соли в виде растворов различной концентрации могут как повышать теплопроводность материалов — за счет повышения влагосодержания, так и понижать — при наличии поровых растворов с коэффициентом теплопроводности более низким, чем теплопроводность солей в твердой фазе и теплопроводность поровой влаги без солей.

3. Учет влияния солей на теплопроводность строительных материалов необходим для корректного проектирования наружных ограждающих конструкций зданий.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Erofeev V.T., Bogatov A.D., Bogatova S.N., Smirnov V.F., Rimshin V.I., Kurbatov V.L. Bioresistant building composites on the basis of glass wastes // *Bio-sciences Biotechnology Research Asia*. 2015. Vol. 12. Issue 1. Pp. 661–669. URL: <http://www.biotech-asia.org/?p=5984> DOI: 10.13005/bbra/1710
2. Баженов Ю.М., Король Е.А., Ерофеев В.Т., Митина Е.А. Ограждающие конструкции с использованием бетонов низкой теплопроводности (основы теории, методы расчета и технологическое проектирование). М. : Изд-во АСВ, 2008. 320 с. URL: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785930935202.html>
3. Ерофеев В.Т., Дергунова А.В. Экономическая эффективность повышения долговечности строительных конструкций // *Строительные материалы*. 2008. № 2. С. 88–89.
4. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Ярмаковский В.Н., Ерофеев В.Т. О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций // *Academia. Архитектура и строительство*. 2015. № 1. С. 93–102. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/o-sovremennyh-metodah-obespecheniya-dolgovечности-zhelezobetonnyh-konstruktsiy>
5. Ерофеев В.Т., Коротаев С.А., Панфилов С.А., Фомин Ю.А., Митина Е.А., Балатханова Э.М. и др. Влияние кварцево-песчаного наполнителя на теплопроводность цементных композитов // *Приволжский научный журнал*. 2015. № 4 (36). С. 55–60.
6. Афонин В.В., Ерофеева И.В., Зоткина М.М., Емельянов Д.В., Подживотов Н.Ю. Эталонная оценка качества изображений композиционных материалов, подверженных воздействию положительных и отрицательных температур // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. Вып. 1. С. 83–93. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.1.83-93
7. Ерофеев В.Т., Коротаев С.А., Ельщицева Т.Ф. Актуальные вопросы оценки влияния солей и влаги на эксплуатационные свойства ограждающих конструкций зданий // *Актуальные вопросы архитектуры и строительства : мат. XV Междунар.*

науч.-техн. конф. Саранск : Изд-во Мордовского ун-та, 2017. С. 159–167.

8. *Ерофеев В.Т., Ельчищева Т.Ф., Родин А.И., Смирнов И.В., Меркулов Д.А., Федорцов В.А. и др.* Исследование свойств бетона железобетонных конструкций сооружений, эксплуатируемых в прибрежной зоне Черноморского побережья // Транспортные сооружения. 2018. № 2. DOI: 10.15862/05SATS218 URL: <https://t-s.today/PDF/05SATS218.pdf>

9. *Ерофеев В.Т., Баженов Ю.М., Богатов А.Д., Морозов А.Е., Митина Е.А., Коротаяев С.А. и др.* Строительные материалы на основе отходов стекла. Саранск : Изд-во Мордовского ун-та, 2005. 120 с.

10. *Ерофеев В.Т., Меркулов И.И., Меркулов А.И., Ерофеев П.С.* Оптимизация составов бетонов с применением численного моделирования. Саранск : Изд-во Мордовского ун-та, 2006. 100 с.

11. *Калашиников В.И., Ерофеев В.Т., Тараканов О.В.* Суспензионно-наполненные бетонные смеси для порошково-активированных бетонов нового поколения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2016. № 4 (688). С. 30–37.

12. *Ерофеев В.Т., Черкасов В.Д., Лантев Г.А., Ерофеев П.С., Меркулов А.И.* Моделирование свойств металлобетонов // Фундаментальные исследования. 2015. № 2 (17). С. 3699–3708.

13. *Ерофеев В.Т., Черкасов В.Д., Емельянов Д.В., Ерофеева И.В.* Ударная прочность цементных композитов // Academia. Архитектура и строительство. 2017. № 4. С. 89–94.

14. *Максимова И.Н., Макридин Н.И., Ерофеев В.Т., Скачков Ю.П.* Структура и конструкционная прочность цементных композитов. М. : Изд-во АСВ, 2017. 400 с. URL: <http://www.studmedlib.ru/ru/book/ISBN9785432302243.html>

15. *Ерофеева И.В., Афонин В.В., Федорцов В.А., Емельянов Д.В., Подживотов Н.Ю., Зоткина М.М.* Исследование поведения цементных композитов в условиях повышенной влажности и переменных положительных температур // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2017. Т. 13. № 4. С. 66–81. URL: <http://ijccse.iasv.ru/article/view/89/58>. DOI: 10.22337/2587-9618-2017-13-4-66-81

16. *Соломатов В.И., Ерофеев В.Т., Смирнов В.Ф., Семичева А.С., Морозов Е.А.* Биологическое сопротивление материалов. Саранск : Изд-во Мордовского ун-та, 2001. 196 с.

17. *Добищиц Л.М.* Физико-математическая модель разрушения бетона при попеременном замораживании и оттаивании // Жилищное строительство. 2017. № 12. С. 30–36.

18. *Латыпов В.М., Латыпова Т.В., Луцык Е.В., Федоров П.А.* Долговечность бетона и железобетона в природных агрессивных средах. Уфа : Изд-во Уфимского государственного нефтяного технического ун-та. 2014. 288 с. URL: <https://b-ok.org/book/3502475/533dd1>

19. *Загоруйко Т.В.* Структурные изменения композиционных материалов в условиях термических воздействий // Пожаровзрывобезопасность. 2011. Т. 20. № 10. С. 8–10. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/strukturnye-izmeneniya-kompozitsionnyh-materialov-v-usloviyah-termicheskikh-vozdeystviy>

20. *Кряжев Д.В., Смирнов В.Ф.* Роль факторов климатического старения в оценке устойчивости полимерных материалов к действию микроскопических грибов // Пластические массы. 2010. № 6. С. 46–48.

21. *Старцев С.А.* Биоповреждение строительных конструкций как фактор, снижающий долговечность зданий и сооружений // Проблемы долговечности зданий и сооружений в современном строительстве : сб. тр. Междунар. конф. по проблемам долговечности зданий и сооружений в современном строительстве, 10–12 октября 2007, Санкт-Петербург. СПб. : РИФ «Роза мира», 2007. С. 20–24.

22. *Фаликман В.Р., Степанова В.Ф.* Современные проблемы обеспечения долговечности железобетонных конструкций // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2015. № 2 (966). С. 55–61.

23. *Федорцов А.П.* Физико-химическое сопротивление строительных композитов и способы его повышения. Саранск : Изд-во Мордовского ун-та, 2015. 462 с.

24. *Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Ярмаковский В.Н., Ерофеев В.Т.* О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций // Academia. Архитектура и строительство. 2015. № 1. С. 93–102.

25. *Ерофеев В.Т., Смирнов В.Ф., Морозов Е.А., Атыкян Н.А., Смирнова О.Н., Губанов Д.А. и др.* Микробиологическое разрушение материалов / под общ. ред. В.Т. Ерофеева, В.Ф. Смирнова. М. : Изд-во АСВ, 2008. 128 с. URL: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785930935516.html>

26. *Ерофеев В.Т., Богатов А.Д., Богатова С.Н., Смирнов В.Ф., Захарова Е.А.* Исследование биостойкости строительных материалов с учетом их старения // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: строительство и архитектура. 2011. № 22 (41). С. 73–78.

27. *Бажанова М.Е., Ерофеев В.Т.* Стойкость трубопроводных материалов в условиях воздействия почвенных микроорганизмов // Вестник Белгородского государственного технологического ун-та им. В.Т. Шухова. 2012. № 1. С. 31–33. URL: [http://vestnik\\_rus.bstu.ru/arhiv](http://vestnik_rus.bstu.ru/arhiv)

28. *Ерофеев В.Т., Богатов А.Д., Богатова С.Н., Казначеев С.В., Смирнов В.Ф.* Влияние эксплуатационной среды на биостойкость строительных композитов // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 7 (33). С. 23–31. URL: [http://engstroy.spbstu.ru/index\\_2012\\_07/bogatova.pdf](http://engstroy.spbstu.ru/index_2012_07/bogatova.pdf). DOI: 10.5862/MCE.33.3

29. Ерофеев В.Т., Федорцов А.П., Богатов А.Д., Федорцов Б.А. Основы математического моделирования биокоррозии полимербетонов // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 12–4. С. 701–707. URL: <https://fundamental-research.ru/pdf/2014/12-4/36174.pdf>
30. Ельчищева Т.Ф. Оценка влияния качества воздушного бассейна в г. Тамбове на наружные ограждающие конструкции зданий // *Биосферная совместимость: человек, регион, технологии*. 2014. № 3 (7). С. 43–49.
31. Бареев В.И. Влияние защитных лакокрасочных покрытий на влажностный режим ограждающих конструкций в условиях солевого воздействия (на примере калийных комбинатов) : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1976. 18 с.
32. Александровский С.В. Долговечность наружных ограждающих конструкций. М. : Стройиздат, 2004. 333 с.
33. Береговой А.М. Исследование теплофизических условий и процессов коррозии ограждающих конструкций цехов по производству азотной кислоты : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1970. 18 с.
34. Чайка Н.А. Исследование коррозии бетонов различной структуры при действии растворов хлористого калия: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1973. 25 с.
35. Серещечкина С.А. Исследование коррозионной стойкости керамзитобетона для ограждающих конструкций зданий калийных комбинатов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1974. 19 с.
36. Бондаренко И.Н., Тарынина Е.В., Бондаренко А.И. Воздействие среды на подземные конструкции жилых зданий // *Жилищное строительство*. 1997. № 1. С. 19–20.
37. Курбатов В.Л., Римшин В.И. Экспериментальные исследования деструкции цементных бетонов // *Университетская наука. Современная наука. Теоретический и практический взгляд*. 2016. № 1. С. 7–14.
38. Селяев В.П., Ошкина Л.М., Селяев П.В., Сорокин Е.В. Исследование химической стойкости цементных бетонов с учетом сульфатной коррозии // *Региональная архитектура и строительство*. 2013. № 1. С. 4–11.
39. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Основы бетонovedения. СПб. : Строй Бетон, 2006. 691 с.
40. Ребиндер П.А. Сушка и увлажнение строительных материалов и изделий. М. : Профиздат, 1958. 218 с.
41. Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.Н., Гузев Е.А. Коррозия бетона и железобетона. Методы их защиты. М. : Стройиздат, 1980. 536 с.
42. Бессонов И.В., Баранов В.С., Баранов В.В., Князева В.П., Ельчищева Т.Ф. Причины появления и способы устранения высолов на кирпичных стенах зданий // *Жилищное строительство*. 2014. № 7. С. 39–43.
43. Инчик В.В. Высолы и солевая коррозия кирпичных стен. СПб. : СПбГАСУ, 2000. 48 с.
44. Ельчищева Т.Ф. Влажностный режим помещений зданий с производственной средой, содержащей гигроскопические соли // *Биосферная совместимость: человек, регион, технологии*. 2016. № 4 (16). С. 13–21. URL: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_27522296\\_38152139.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_27522296_38152139.pdf)
45. Езерский В.А., Ельчищева Т.Ф. Исследование влияния солей на теплопроводность ячеистого бетона // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2003. Т. 9. № 2. С. 286–298. DOI: 10.0000/cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-soley-na-teploprovodnost-yacheistogo-betona
46. Дегтярев О.В. Исследование влажностного состояния ограждающих конструкций зданий в условиях солевого воздействия : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1971. 22 с.
47. Обьедков В.А. Влияние хлористого натрия на теплопроводность газобетона // *Бетон и железобетон*. 1996. № 12. С. 9–10.
48. Кузнецова Н.В. Улучшение влажностного режима наружных стен цехов по производству фосфорных солей : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2002. 179 с.
49. Езерский В.А. Физико-технические основы обеспечения эксплуатационной надежности ограждающих конструкций зданий при воздействии гигроскопических солей : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1994. 38 с.
50. Береговой А.М., Береговой В.А. Температурно-влажностное состояние наружных ограждений в условиях фазовых переходов влаги и агрессивных воздействий среды // *Региональная архитектура и строительство*. 2017. № 3. С. 99–104.
51. Обьедков В.А., Феофанова А.И., Езерский В.А. Коэффициент теплопроводности соледержащих каменных материалов // *Вопросы температурно-влажностного режима памятников истории и культуры* : сб. науч. тр. М. : Изд-во НМС МКС СССР, 1980. С. 18–33.
52. Лыков А.В. Тепломассообмен. М. : Энергия, 1978. 481 с.
53. Лыков А.В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах. М. : Гостехиздат, 1954. 296 с.
54. Мальцев А.В., Береговой А.М., Береговой В.А., Дерина М.А. Влияние теплопроводности материала наружных ограждений в стадии увлажнения и промерзания на энергоэффективность зданий // *Региональная архитектура и строительство*. 2013. № 1. С. 57–61.
55. Пат. РФ 137738 U1, МПК G01N 33/00 (2006.01). Установка для определения теплофизических характеристик засоленных стеновых материалов нестационарным импульсным методом с использованием линейного источника тепла /

Т.Ф. Ельчищева, М.А. Ельчищев ; Заявитель и патентообл. ФГБОУ ВПО ТГТУ. № 2013134818, заявл. 23.07.2013; опубл. 27.02.2014. Бюл. № 6.

56. *Езерский В.А., Ельчищева Т.Ф.* Анализ влияния солей на теплопроводность некоторых стеновых материалов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2008. Т. 14. № 3. С. 645–651.

57. *Гаевой А.Ф., Качура Б.А.* Качество и долговечность ограждающих конструкций из ячеистого бетона. Харьков : Вища школа, 1978. 224 с.

58. *Миснар А.* Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. М. : Мир, 1968. 464 с.

59. *Ильинский В.М.* Проектирование ограждающих конструкций зданий с учетом физико-климатических воздействий. М. : Стройиздат, 1964. 295 с.

60. *Ельчищева Т.Ф.* Энергоэффективное проектирование наружных ограждающих конструкций зданий при воздействии неблагоприятных факторов окружающей среды // Научно-технический про-

гресс: актуальные и перспективные направления будущего : сб. мат. II Междунар. науч.-практ. конф. Кемерово : Изд-во ЗапСибНЦ, 2016. Т. 2. С. 133–135.

61. *Гагарин В.Г., Зубарев К.П., Козлов В.В.* Определение зоны наибольшего увлажнения в стенах с фасадными теплоизоляционными композиционными системами с наружными штукатурными слоями // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 1 (54). С. 125–132. URL: <https://vestnik.tsuab.ru/jour/article/view/136/137>

62. *Гагарин В.Г., Козлов В.В., Зубарев К.П.* Анализ расположения зоны наибольшего увлажнения в ограждающих конструкциях с различной толщиной теплоизоляционного слоя // Жилищное строительство. 2016. № 6. С. 8–12.

63. *Gagarin V.G., Kozlov V.V., Zubarev K.P.* Determination of maximum moisture zone on enclosing structures // Springer Proceedings in Energy. 2019. Pp. 925–932. DOI: 10.1007/978-3-030-00662-4\_78

Поступила в редакцию 2 февраля 2019 г.

Принята в доработанном виде 8 апреля 2019 г.

Одобрена для публикации 29 апреля 2019 г.

О Б АВТОРЕ: **Ельчищева Татьяна Федоровна** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры архитектуры и строительства зданий, **Тамбовский государственный технический университет (ТГТУ)**, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, [elschevat@mail.ru](mailto:elschevat@mail.ru).

## REFERENCES

1. Erofeev V.T., Bogatov A.D., Bogatova S.N., Smirnov V.F., Rimshin V.I., Kurbatov V.L. Bioresistant building composites on the basis of glass wastes. *Biosciences Biotechnology Research Asia*. 2015; 12(1):661-669. URL: <http://www.biotech-asia.org/?p=5984> DOI: 10.13005/bbra/1710

2. Bazhenov Yu.M., Korol E.A., Erofeev V.T., Mitina E.A. *Enclosing structures using concrete of low thermal conductivity (basic theory, calculation methods and technological design)*. Moscow, ASV Publ., 2008; 320. URL: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785930935202.html> (rus.)

3. Erofeev V.T., Dergunova A.V. The economic efficiency of increasing the durability of building structures. *Construction Materials*. 2008; 2:88-89. (rus.)

4. Karpenko N.I., Karpenko S.N., Yarmakovsky V.N., Erofeev V.T. On modern methods of ensuring the durability of reinforced concrete structures. *Academia. Architecture and Construction*. 2015; 1:93-102. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/o-sovremennyh-metodah-obespecheniya-dolgovechnosti-zhelezo-betonnyh-konstruktsiy> (rus.)

5. Erofeev V.T., Korotaev S.A., Panfilov S.A., Fomin Yu.A., Mitina E.A., Balathanova E.M. et al. The influence of silica sand filler on the thermal conductivity of cement composites. *Volga Scientific Journal*. 2015; 4(36):55-60. (rus.)

6. Afonin V.V., Erofeeva I.V., Zotkina M.M., Emelyanov D.V., Podzhivotov N.Yu. Reference image quality assessment of composite materials exposed to positive and negative temperatures. *Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]*. 2019; 14(1):83-93. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.1.83-93 (rus.)

7. Erofeev V.T., Korotaev S.A., Elchishcheva T.F. Current issues of assessing the effect of salts and moisture on the operational properties of enclosing building structures. *Current Issues of Architecture and Construction : materials of the XVth International Scientific and Technical Conference*. Saransk, Publishing house of Mordovia University, 2017; 159-167. (rus.)

8. Erofeev V.T., Elchishcheva T.F., Rodin A.I., Smirnov I.V., Merkulov D.A., Fedortsov V.A. et al. Investigation of concrete properties of reinforced con-



crete constructions of structures operated in the coastal zone of the Black Sea coast. *Russian journal of transport engineering*. 2018; 2. URL: <https://t-s.today/PDF/05SATS218.pdf>. DOI: 10.15862/05SATS218 (rus.).

9. Erofeev V.T., Bazhenov Yu.M., Bogatov A.D., Morozov A.E., Mitina E.A., Korotaev S.A. et al. *Building materials based on glass waste*. Saransk, Publishing house of Mordovia University, 2005; 120. (rus.).

10. Erofeev V.T., Merkulov I.I., Merkulov A.I., Erofeev P.S. *Optimization of concretes using numerical modeling*. Saransk, Publishing house of Mordovia University, 2006; 100. (rus.).

11. Kalashnikov V.I., Erofeev V.T., Tarakanov O.V. Suspension-filled concrete mixes for powder-activated concrete of a new generation. *News of higher educational institutions. Building*. 2016; 4(688):30-37. (rus.).

12. Erofeev V.T., Cherkasov V.D., Laptev G.A., Erofeev P.S., Merkulov A.I. Modeling the properties of metal-concrete. *Fundamental research*. 2015; 2(17):3699-3708. (rus.).

13. Erofeev V.T., Cherkasov V.D., Emelyanov D.V., Erofeeva I.V. Impact strength of cement composites. *Akademia. Architecture and construction*. 2017; 4:89-94. (rus.).

14. Maksimova I.N., Makridin N.I., Erofeev V.T., Skachkov Yu.P. *Structure and structural strength of cement composites*. Moscow, ASV Publ., 2017; 400. URL: <http://www.studmedlib.ru/ru/book/ISBN9785432302243.html> (rus.).

15. Erofeeva I.V., Afonin V.V., Fedortsov V.A., Emelyanov D.V., Podzhivotov N.Yu., Zotkina M.M. Research of behavior of cement composites in conditions of high humidity and variable positive temperatures. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017; 13(4):66-81. URL: <http://ijccse.iasv.ru/article/view/89/58>. DOI: 10.22337/2587-9618-2017-13-4-66-81 (rus.).

16. Solomatov V.I., Erofeev V.T., Smirnov V.F., Semicheva A.S., Morozov E.A. *Biological resistance of materials*. Saransk, Publishing house of Mordovia University, 2001; 196. (rus.).

17. Dobshits L.M. Physico-mathematical model of concrete destruction during alternate freezing and thawing. *Housing construction*. 2017; 12:30-36. (rus.).

18. Latypov V.M., Latypova T.V., Lutsyk E.V., Fedorov P.A. *The durability of concrete and reinforced concrete in natural aggressive environments*. Ufa, Publishing house of the Ufa State Oil Technical University, 2014; 288. URL: <https://b-ok.org/book/3502475/533dd1> (rus.).

19. Zagoruiko T.V. Structural changes of composite materials under thermal effects. *Fire and Explosion Safety*. 2011; 20(10):8-10. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/strukturnye-izmeneniya-kompozitsionnyh-materialov-v-usloviyah-termicheskikh-vozdeystviy> (rus.).

20. Kryazhev D.V., Smirnov V.F. The role of climatic aging factors in the assessment of the resistance of polymeric materials to the action of microscopic fungi. *Plastics*. 2010; 6:46-48. (rus.).

21. Startsev S.A. Biological damage to building structures as a factor that reduces the durability of buildings and structures. *Problems of durability of buildings and structures in modern construction: coll. tr. International conf. on the problems of durability of buildings and structures in modern construction, October 10–12, 2007, St. Petersburg*. St. Petersburg, RIF “Rose of the World” Publ., 2007; 20-24. (rus.).

22. Falikman V.R., Stepanova V.F. Modern problems of ensuring durability of ferroconcrete designs. *BST: Bulletin of construction equipment*. 2015; 2(966):55-61. (rus.).

23. Fedortsov A.P. *Physico-chemical resistance of building composites and ways to increase it*. Saransk, Publishing house of Mordovia University, 2015; 462. (rus.).

24. Karpenko N.I., Karpenko S.N., Yarmakovskiy V.N., Erofeev V.T. On modern methods of ensuring the durability of reinforced concrete structures. *Academia. Architecture and construction*. 2015; 1:93-102. (rus.).

25. Erofeev V.T., Smirnov V.F., Morozov E.A., Atykyan N.A., Smirnova O.N., Gubanov D.A. et al. *Microbiological destruction of materials* / ed. V.T. Erofeev, V.F. Smirnov. Moscow, ASV Publ., 2008; 128. URL: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785930935516.html> (rus.).

26. Erofeev V.T., Bogatov A.D., Bogatova S.N., Smirnov V.F., Zakharova E.A. Investigation of the biostability of building materials with regard to their aging. *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering Series: Civil Engineering and Architecture*. 2011; 22(41):73-78. (rus.).

27. Bazhanova M.E., Erofeev V.T. Resistance of pipeline materials under the influence of soil microorganisms. *Bulletin of the Belgorod State Technological University after name V.T. Shukhov*. 2012; 1:31-33. URL: [http://vestnik\\_rus.bstu.ru/arhiv](http://vestnik_rus.bstu.ru/arhiv) (rus.).

28. Erofeev V.T., Bogatov A.D., Bogatova S.N., Kaznacheev S.V., Smirnov V.F. Influence of the operational environment on the biostability of building composites. *Engineering and Construction Journal*. 2012; 7(33):23-31. URL: [http://engstroy.spbstu.ru/index\\_2012\\_07/bogatova.pdf](http://engstroy.spbstu.ru/index_2012_07/bogatova.pdf). DOI: 10.5862/MCE.33.3 (rus.).

29. Erofeev V.T., Fedortsov A.P., Bogatov A.D., Fedortsov B.A. Bases of mathematical modelling biocorrosion polymer-concrete. *Fundamental research*. 2014; 12-4:701-707. URL: <https://fundamental-research.ru/pdf/2014/12-4/36174.pdf> (rus.).

30. Elchishcheva T.F. Evaluation of the impact of air quality in the city of Tambov on the external building

envelope. *Biosphere compatibility: man, region, technology*. 2014; 3(7):43-49. (rus.).

31. Bareev V.I. *The effect of protective coatings on the moisture regime of enclosing structures under salt exposure (for example, potash plants) : author's abstract of candidate of technical sciences*. Moscow, 1976; 18. (rus.).

32. Aleksandrovsky S.V. *Durability of external enclosing structures*. Moscow, Stroyizdat Publ., 2004; 333. (rus.).

33. Beregovoy A.M. *Investigation of thermophysical conditions and processes of corrosion of protecting structures of nitric acid workshop s: author's abstract of candidate of technical sciences*. Moscow, 1970; 18. (rus.).

34. Chaika N.A. *Investigation of corrosion of concrete of different structure under the action of solutions of potassium chloride : author's abstract of candidate of technical sciences*. Moscow, 1973; 25. (rus.).

35. Serezhechkina S.A. *Investigation of the corrosion resistance of expanded clay concrete for enclosing structures of buildings of potash plants : author's abstract of candidate of technical sciences*. Moscow, 1974; 19. (rus.).

36. Bondarenko I.N., Tarynina E.V., Bondarenko A.I. The impact of the environment on the underground structures of residential buildings. *Housing construction*. 1997; 1:19-20. (rus.).

37. Kurbatov V.L., Rimshin V.I. Experimental studies of the destruction of cement concretes. *University Science. "Modern science. Theoretical and practical view"*. 2016; 1:7-14. (rus.).

38. Selyaev V.P., Oshkina L.M., Selyaev P.V., Sorokin E.V. Investigation of the chemical resistance of cement concretes, taking into account sulfate corrosion. *Regional architecture and construction*. 2013; 1:4-11. (rus.).

39. Dvorkin L.I., Dvorkin O.L. *Basics of concrete science*. St. Petersburg, Build Concrete Publ., 2006; 691. (rus.).

40. Rebinder P.A. *Drying and wetting of building materials and products*. Moscow, Profizdat Publ., 1958; 218. (rus.).

41. Moskvina V.M., Ivanov F.M., Alekseev S.N., Guzeev E.A. *Corrosion of concrete and reinforced concrete. Methods for their protection*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1980; 536. (rus.).

42. Bessonov I.V., Baranov V.S., Baranov V.V., Knyazeva V.P., Elchishcheva T.F. Causes of occurrence and methods of eliminating efflorescence on the brick walls of buildings. *Housing construction*. 2014; 7:39-43. (rus.).

43. Inchik V.V. *Vysola and salt corrosion of brick walls*. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2000; 48. (rus.).

44. Elchishcheva T.F. Humidity regime of buildings with a production environment containing hygroscopic salts. *Biosphere compatibility: man, region,*

*technology*. 2016; 4(16):13-21. URL: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_27522296\\_38152139.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_27522296_38152139.pdf) (rus.).

45. Yezerzky V.A., Elchishcheva T.F. Study of the effect of salts on the thermal conductivity of cellular concrete. *Herald of the Tambov State Technical University*. 2003; 9(2):286-298. DOI: 10.0000/cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-soley-na-teploprovodnost-yacheistogo-betona (rus.).

46. Degtyarev O.V. *Investigation of the moisture state of enclosing structures of buildings under salt exposure conditions : author's abstract of candidate of technical sciences*. Moscow, 1971; 22. (rus.).

47. Ob'edkov V.A. Effect of sodium chloride on the thermal conductivity of aerated concrete. *Concrete and reinforced concrete*. 1996; 12:9-10. (rus.).

48. Kuznetsova N.V. *Improving the moisture regime of the external walls of the phosphate salt production workshops : author's abstract of candidate of technical sciences*. Penza, 2002; 179. (rus.).

49. Yezerzky V.A. *Physico-technical basis for ensuring the operational reliability of enclosing structures of buildings when exposed to hygroscopic salts : author's abstract of doctor of technical sciences*. Moscow, 1994; 38. (rus.).

50. Beregovoy A.M., Beregovoy V.A. Temperature-humidity state of external fences in conditions of phase transitions of moisture and aggressive environmental influences. *Regional architecture and construction*. 2017; 3:99-104. (rus.).

51. Ob'edkov V.A., Feofanova A.I., Yezerzky V.A. The coefficient of thermal conductivity of salt-containing stone materials. *Questions of temperature and humidity of historical and cultural monuments: collection of articles scientific tr.* Moscow, Publishing House of the NMS MK USSR. 1980; 18-33. (rus.).

52. Lykov A.V. *Heat and mass transfer*. Moscow, Energy Publ., 1978; 480. (rus.).

53. Lykov A.V. *Transport phenomena in capillary-porous bodies*. Moscow, Gostekhizdat Publ., 1954; 296. (rus.).

54. Maltsev A.V., Beregovoy A.M., Beregovoy V.A., Derina M.A. The effect of thermal conductivity of the material of external fences in the stage of wetting and freezing on the energy efficiency of buildings. *Regional architecture and construction*. 2013; 1:57-61. (rus.).

55. Pat. 137738 U1 Russian Federation, IPC G01N 33/00 (2006.01). *Installation for determining the thermophysical characteristics of saline wall materials by non-stationary pulsed method using a linear heat source* / Elchishcheva T.F., Elchishchev M.A.; applicant and patent holder of FSBEI HPE TSTU; No. 2013134818, declare. 07.23.2013; publ. 02.27.2014, Bull. No. 6. (rus.).

56. Yezerzky V.A., Elchishcheva T.F. Analysis of the effect of salts on the thermal conductivity of some wall materials. *Vestnik of Tambov State Technical University*. 2008; 14(3):645-651. (rus.).

57. Gaevoy A.F., Kachura B.A. *The quality and durability of enclosing structures of cellular concrete*. Kharkov, Higher school Publ., 1978; 224. (rus.).
58. Misnar A. *Thermal conductivity of solids, liquids, gases and their compositions*. Moscow, Mir Publ., 1968; 463. (rus.).
59. Il'insky V.M. *Design of enclosing structures of buildings taking into account the climatic effects*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1964; 295. (rus.).
60. Elchishcheva T.F. Energy-efficient design of external enclosing structures of buildings under the influence of adverse environmental factors. *Scientific and technical progress: current and future areas of the future: collection of materials II Intern. scientific-practical conf.* Kemerovo, ZapSibNTS Publ., 2016; 2:133-135. (rus.).
61. Gagarin V.G., Zubarev K.P., Kozlov V.V. Determination of the zone of maximum moisture in the walls with facade thermal insulation composite systems with external plaster layers. *Tomsk State Architectural and Construction University*. 2016; 1(54):125-132. URL: <https://vestnik.tsuab.ru/jour/article/view/136/137> (rus.).
62. Gagarin V.G., Kozlov V.V., Zubarev K.P. Analysis of the location of the zone of maximum moisture in enclosing structures with different thickness of the insulating layer. *Housing construction*. 2016; 6:8-12. (rus.).
63. Gagarin V.G., Kozlov V.V., Zubarev K.P. Determination of maximum moisture zone on enclosing structures. *Springer Proceedings in Energy*. 2018; 925-932. DOI: 10.1007/978-3-030-00662-4\_78

Received February 2, 2019

Adopted in a modified form on April 8, 2019

Approved for publication April 29, 2019

**BIONOTES:** **Tatiana F. Elchishcheva**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Architecture and Construction of Buildings, **Tambov State Technical University (TSTU)**, 106 Sovetskaya st., Tambov, 392000, Russian Federation, [elschevat@mail.ru](mailto:elschevat@mail.ru).