

УДК 691.32:620.193.01

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-40-51](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-40-51)

**А.В. БУЧКИН¹, Г.В. ЧЕХНИЙ^{1,✉}, Н.К. РОЗЕНТАЛЬ², С.А. ОРЕХОВ¹,
С.И. ИВАНОВ¹, А.И. ПАСТУХОВ¹**

¹ Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 5, г. Москва, 109428, Российская Федерация

² АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 1, г. Москва, 109428, Российская Федерация

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ БЕТОНА В ПРОЦЕССЕ ЗАМОРАЖИВАНИЯ И ОТТАИВАНИЯ ОБРАЗЦОВ ПО ГОСТ 10060–2012

Аннотация

Введение. На основании выполненных экспериментальных исследований морозостойкости бетона по режиму ускоренного третьего метода ГОСТ 10060-2012 (с Изменением № 1) с различными способами оттаивания образцов рассчитаны коэффициенты перехода (K) от марки бетона по морозостойкости, определенной при оттаивании в условиях неполного погружения емкостей с образцами в раствор 5%-ного хлорида натрия или при обдуве емкостей с образцами теплым воздухом, к марке бетона, определенной стандартным методом с оттаиванием образцов в ванне с раствором 5%-ного хлорида натрия. Расчетным методом термонапряженного состояния бетона показано, что изменение методики проведения испытаний бетона на морозостойкость, включая способ оттаивания образцов после замораживания, может стать причиной недостоверной оценки качества бетона.

Цель. Численный расчет термонапряженного состояния испытываемых образцов-кубов выполнен с целью выявления особенностей различных способов оттаивания бетонных образцов после замораживания и уточнения разработанных переходных коэффициентов для назначения марки бетона по морозостойкости.

Материалы и методы. Выполнен численный расчет процесса замораживания и оттаивания бетонных образцов в процессе испытания на морозостойкость ускоренным третьим методом по ГОСТ 10060-2012 (с Изменением № 1) в программном комплексе

АТЕНА. По результатам расчета теоретических значений температуры определены перепады температуры между ядром и поверхностью кубов и определены максимальные растягивающие напряжения на их поверхности в момент наибольших перепадов температуры.

Результаты. Численный расчет термонапряженного состояния испытываемых образцов в процессе замораживания и различных режимов оттаивания при определении морозостойкости бетона ускоренным третьим методом подтвердил результаты экспериментальных лабораторных работ и показал, что режим оттаивания при неполном погружении емкостей с образцами в раствор качественно отличается от остальных рассмотренных способов оттаивания и является наиболее «жестким» вследствие возможности образования поверхностных трещин на бетонной поверхности образцов в процессе испытания.

Выводы. Опыт применения численных расчетов термонапряженного состояния испытываемых образцов показал возможность (по мере накопления экспериментальных данных) использовать их для прогнозирования морозостойкости бетона.

Ключевые слова: морозостойкость, способ оттаивания, термонапряженное состояние, численный расчет, переходный коэффициент, температурный режим испытания, растягивающие напряжения, критическое значение

Для цитирования: Бучкин А.В., Чехний Г.В., Розенталь Н.К., Орехов С.А., Иванов С.И., Пастухов А.И. Опыт применения численных расчетов термонапряженного состояния бетона в процессе замораживания и оттаивания образцов по ГОСТ 10060-2012 // *Бетон и железобетон*. 2025. № 3 (628). С. 40–51. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-40-51](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-40-51). EDN: MDMMNA

Вклад авторов

Бучкин А.В. – общее руководство, написание статьи.
Чехний Г.В. – постановка работы, написание статьи.
Розенталь Н.К. – написание статьи.
Орехов С.А. – испытания бетона.
Иванов С.И. – разработка программы выполнения расчетов.
Пастухов А.И. – выполнение расчетов.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 20.03.2025

Поступила после рецензирования 28.04.2025

Принята к публикации 01.05.2025

**A.V. BUCHKIN¹, G.V. CHEKHNI^{1,✉}, N.K. ROZENTAL², S.A. OREKHOV¹,
S.I. IVANOV¹, A.I. PASTUKHOV¹**

¹ Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 5, Moscow, 109428, Russian Federation

² JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 1, Moscow, 109428, Russian Federation

EXPERIENCE OF USING NUMERICAL CALCULATIONS OF THERMALLY STRESSED STATE OF CONCRETE DURING FREEZING AND THAWING OF SAMPLES AS PER STATE STANDARD 10060–2012

Abstract

Introduction. Based on the experimental studies of the frost resistance of concrete according to the accelerated third method of State Standard 10060-2012 (with Change No. 1) with various methods of samples thawing, the coefficients of transition (K) from the grade of concrete frost resistance determined during thawing under conditions of incomplete immersion of sample containers in a solution of 5 % sodium chloride or when blowing sample containers with warm air, to the grade of concrete determined by the standard method of thawing samples in a bath with a solution of 5 % sodium chloride. The calculation method of the thermally stressed state of concrete has shown that a change in the methodology for concrete testing for the

frost resistance, including the method of thawing samples after freezing, can lead to an unreliable assessment of the quality of concrete.

Aim. The numerical calculation of the thermally stressed state of the tested cube samples was performed in order to identify the features of various methods of concrete samples thawing after freezing and to refine the developed transition coefficients for assigning a grade of concrete for frost resistance.

Materials and methods. A numerical calculation of the process of concrete samples freezing and thawing during the frost resistance test using the accelerated third method according to State Standard 10060-2012 (with Change No. 1) in the ATENA software package has

been performed. Based on the results of calculating the theoretical temperature values, the temperature differences between the core and the surface of the cubes were determined and the maximum tensile stresses on their surface were determined at the time of the greatest temperature differences.

Results. Numerical calculation of the thermally stressed state of the tested samples during freezing and various thawing modes when determining the frost resistance of concrete using the accelerated third method confirmed the results of experimental laboratory work and showed that the thawing mode when sample containers are not fully immersed in the solution differs qualitatively from the other thawing methods considered and is the most "rigid" due to the possibility of formation of surface cracks on the concrete surface of the samples during the testing process.

Conclusions. The experience of applying of the numerical calculations of the thermally stressed state of the tested samples has shown that, as experimental data accumulate, they can be used to predict the frost resistance of concrete.

Keywords: frost resistance, thawing method, thermally stressed state, numerical calculation, transition coefficient, test temperature mode, tensile stresses, critical value

For citation: Buchkin A.V., Chekhonii G.V., Rozental N.K., Orekhov S.A., Ivanov S.I., Pastukhov A.I. Experience of using numerical calculations of thermally stressed state of concrete during freezing and thawing of samples as per State Standard 10060-2012. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2025, no. 3 (628), pp. 40–51. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-40-51](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-40-51). EDN: MDMMNA

Authors contribution statement

Buchkin A.V. – general guidance, writing an article.

Chekhonii G.V. – setting up the work, writing the article.

Rozental N.K. – writing an article.

Orekhov S.A. – concrete testing.

Ivanov S.I. – development of a program for performing calculations.

Pastukhov A.I. – calculations performing.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 20.03.2025

Revised 28.04.2025

Accepted 01.05.2025

Изучению морозостойкости бетонов посвящено значительное количество работ, так как этот вид физической коррозии является доминирующим в строительной практике.

Многочисленными работами были установлены основные факторы, от которых зависит морозостойкость бетонов. К ним следует отнести структуру материала, количество пор и характер пористости, степень водонасыщения, температуру замораживания, скорость замораживания и оттаивания и др. Следствием является разработка многочисленных методов испытаний бетона на морозостойкость.

Применение косвенных методов оценки морозостойкости не позволяет надежно определить марку бетона по морозостойкости. Методы многократного замораживания и оттаивания, наиболее надежные в своей основе, позволяют только приближенно оценить морозостойкость бетона в различных условиях эксплуатации конструкций [1]. Поэтому для повышения надежности результатов стандартные методы требуют более детальной регламентации процесса испытаний.

В НИИЖБ им. А.А. Гвоздева выполнена работа по оценке влияния различных способов оттаивания образцов на марку бетона по морозостойкости по режиму ускоренного третьего метода по ГОСТ 10060-2012 [2]. При этом режим замораживания образцов, выдерживания при температуре минус 50 °С и оттаивания до температуры минус 10 °С был одинаков. Различные способы оттаивания образцов после достижения в бетоне температуры минус 10 °С – воздушное оттаивание в условиях обдува емкостей с испытуемыми образцами теплым воздухом и оттаивание при неполном погружении емкостей с образцами в раствор 5%-ного хлорида натрия (далее – раствор) – рассматривали в качестве альтернативных методов оттаивания в сравнении со стандартным методом согласно требованиям обязательного приложения Б «Определение коэффициентов перехода при испытании образцов бетона на морозостойкость различными методами».

Исследования морозостойкости бетона выполнены на двух группах бетона, различающихся по классу прочности от В25 до В45 и маркам по морозостойкости от F_{1,200}–F_{1,300} до F_{1,400}–F_{1,500}. В каждую группу входило по 6 серий бетонов. В основу выбора составов бетона положены полученные ранее результаты исследований морозостойкости тяжелых бетонов. Образцы всех серий твердели в одинаковых условиях. Разброс значений плотности отдельных образцов в серии до их насыщения не превышал ±25 кг/м³ от среднего значения согласно [2, п. 4.10].

За критерий оценки степени повреждения бетона в результате циклического замораживания и оттаивания принято снижение прочности бетона основных образцов, равное 5 %, по сравнению с прочностью контрольных образцов, не подвергавшихся замораживанию.

Достоверность результатов обеспечивалась достаточной повторяемостью испытаний (12 составов бетона с различной прочностью и структурой) и метрологической аттестацией средств измерений и испытательного оборудования.

Исследования показали, что способ оттаивания образцов при неполном погружении в раствор является наиболее «жестким» по сравнению со стандартным способом оттаивания в ванне при полном погружении емкостей с образцами в раствор.

В ходе эксперимента потеря массы образцов всех серий не достигла критического значения стандарта (не более 2 %).

На основании экспериментальных данных рассчитаны переходные коэффициенты к стандартному способу:

Для бетонов с марками по морозостойкости F_{1,200}–F_{1,300}:

$K = 0,7$ (неполное погружение);

$K = 0,8$ (в условиях обдува теплым воздухом).

Для бетонов с марками по морозостойкости F_{1,400}–F_{1,500}:

$K = 0,6$ (неполное погружение);

$K = 0,9$ (в условиях обдува теплым воздухом).

Исследования показали нецелесообразность введения единых переходных коэффициентов для изученных способов оттаивания в автоматических климатических камерах. Для каждой марки бетона по морозостойкости и для альтернативного метода оттаивания должен быть рассчитан свой переходный коэффициент, что и допускается согласно [2, п. 4.1].

С целью выявления особенностей различных способов оттаивания бетонных образцов после замораживания и уточнения разработанных переходных коэффициентов при назначении марки бетона по морозостойкости выполнен численный расчет термонапряженного состояния (ТНС) испытуемых образцов-кубов размерами 100 × 100 × 100 мм.

Численный расчет процесса замораживания – оттаивания производился в программном комплексе ATENA [3], позволяющем моделировать поведение бетонных изделий, включая разрушение, растягивание и растрескивание в уникальной графической среде. Использованный программный комплекс не предназначен для моделирования гидродинамических условий вокруг бетона, поэтому моделирование жидкости с помощью твердого тела имеет некоторую погрешность, при этом позволяет качественно оценить разницу между различными исследуемыми условиями оттаивания бетона. Пространственная модель повторяла геометрию образцов-кубов, характеристики материалов и температурно-влажностные условия эксперимента. Расчет образования и ширины раскрытия трещин выполняется как для бетонного неармированного элемента.

На первом этапе рассчитывали температуру в ядре и на поверхности куба для заданного режима замораживания – оттаивания. На втором этапе рассчитывали растягивающие напряжения на поверхности куба при различных режимах оттаивания.

Расчетные модели включали в себя конечные элементы, моделирующие бетон контрольных образцов, и конечные элементы, моделирующие раствор, окружающий образец, уровень которого устанавливался в зависимости от испытания. Через конечные элементы, моделирующие раствор, происходит отведение тепла от бетона испытываемого образца.

Для материала, моделирующего бетон, задавались все основные физические характеристики, необходимые для расчета ТНС: плотность, теплоемкость, теплопроводность, модуль упругости, прочность бетона на растяжение и др. Значения теплопроводности и теплоемкости бетона приняты по СП 50.13330.2012 [4].

Для раствора, моделирующего жидкую среду вокруг бетона, задавались основные физические характеристики, определяющие отвод от бетона тепла: плотность, теплоемкость и теплопроводность. Параметры раствора, значение теплопроводности и теплоемкости бетона приняты по справочным данным [5].

Воздушная среда, в которой происходило оттаивание, моделировалась коэффициентами теплоотдачи с поверхности бетона, контактирующей с воздушной средой [5].

Режим испытания бетона на морозостойкость уточнен с помощью комплекса измерительного многоканального TDS-530, позволяющего производить измерения температуры с использованием первич-

ных преобразователей – термометров сопротивления ТС-Б.

Термометры сопротивления (датчики) были установлены в бетонные образцы-кубы размерами 100 × 100 × 100 мм (в центре, на верхней, нижней и боковых гранях), а также в емкости для замораживания с раствором (вблизи образцов-кубов), в центре морозильной камеры (в воздушной среде), а также в раствор в ванне для оттаивания образцов. Температуру по термометрам сопротивления и по воздуху климатической камеры фиксировали каждые 30 минут.

Результаты подбора режимов испытания в климатических камерах тепла и холода приведены на рис. 1–3. Заштрихованная область на графиках указывает допустимые границы цикла замораживания и оттаивания по температуре датчика в растворе по ГОСТ 10060-2012 [2].

Граничные условия рассчитывали по формуле 13 [5] с учетом циркуляции раствора в ванне для оттаивания. Модель эксперимента включала точки мониторинга температуры, повторяющие положения датчиков температуры в натурном эксперименте (ядро, верхняя, нижняя и боковые грани). Был произведен расчет трех циклов замораживания и оттаивания, модели отличались тепловым воздействием в среде морозильной камеры, динамикой изменения характеристик бетона и раствора в процессе замораживания и оттаивания.

Граничные условия для принятых режимов оттаивания приведены в табл. 1.

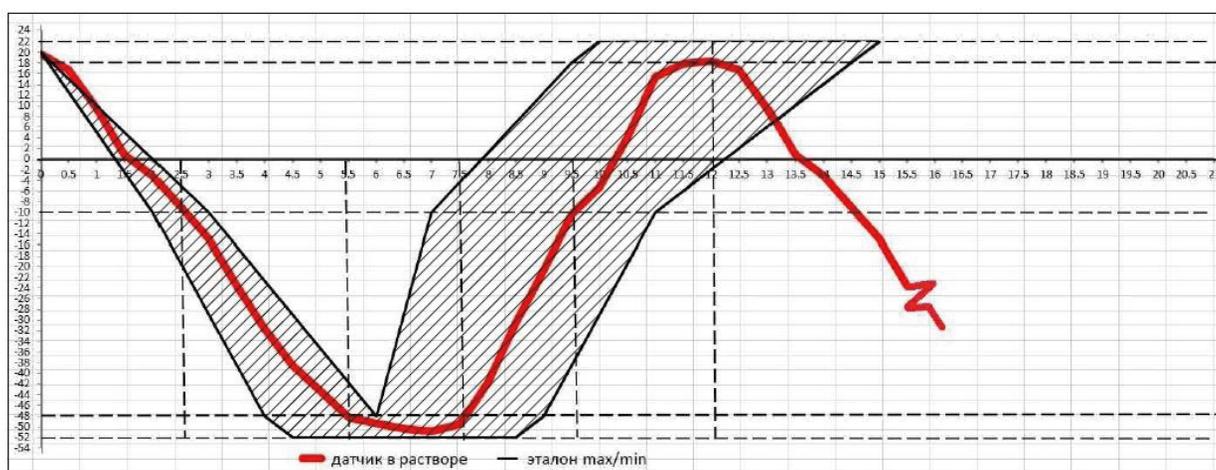


Рис. 1. Температурный режим ЦЗО. Оттаивание в условиях полного погружения емкостей с образцами в ванну для оттаивания с раствором 5%-ного хлорида натрия

Fig. 1. The temperature regime of the freeze-thaw cycle. Thawing under conditions of complete immersion of sample containers in a thawing bath with a solution of 5 % sodium chloride

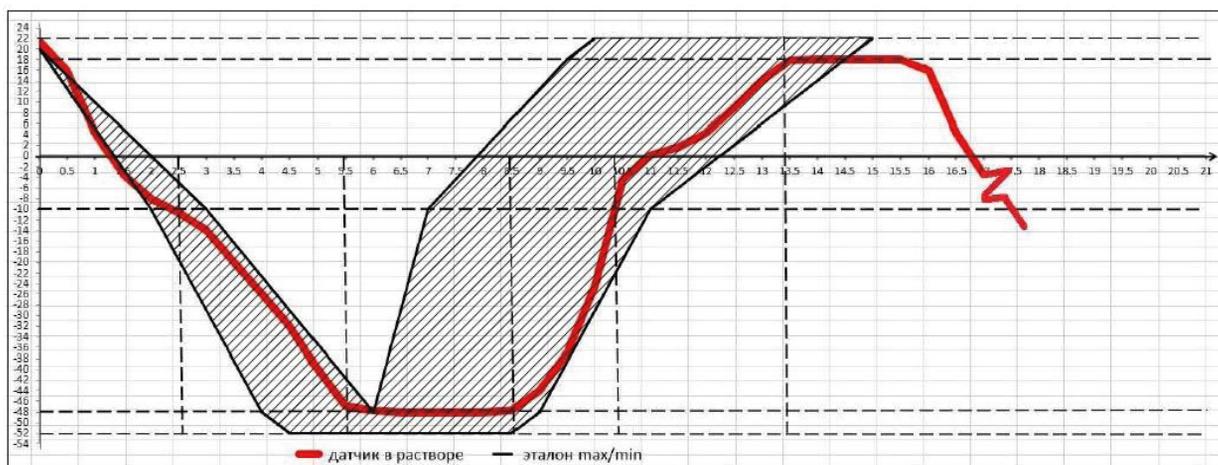


Рис. 2. Температурный режим ЦЗО. Оттаивание в условиях неполного погружения емкостей с образцами в раствор 5%-ного хлорида натрия

Fig. 2. The temperature regime of the freeze-thaw cycle. Thawing under conditions of incomplete immersion of sample containers in a solution of 5 % sodium chloride

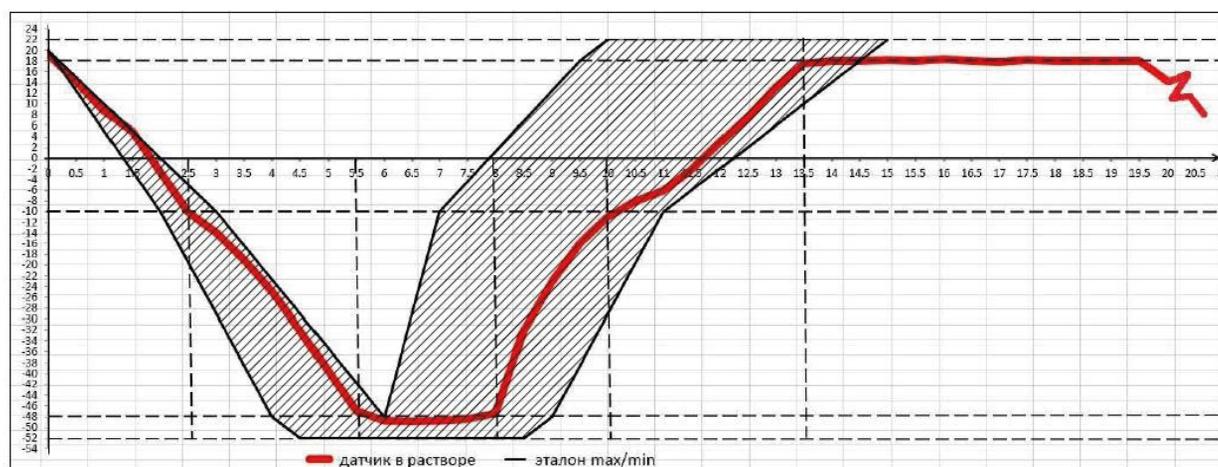


Рис. 3. Температурный режим ЦЗО. Оттаивание емкостей с образцами в условиях обдува теплым воздухом в автоматической климатической камере

Fig. 3. The temperature regime of the freeze-thaw cycle. Thawing of sample containers under conditions of warm air blowing in an automatic climate chamber

Таблица 1
Table 1

Граничные условия для принятых режимов оттаивания
Boundary conditions for accepted thawing modes

№ п/п	Описание	Коэффициент теплоотдачи, α , Вт/м ² °С
1	Теплоотдача образца в процессе замораживания	20–25
2	Теплоотдача образца при оттаивании в растворе 5%-ного хлорида натрия для неполного и полного погружений емкости с образцом	23,5
3	Теплоотдача образца в результате обдува теплым воздухом	15

По результатам расчета получены теоретические графики температуры для каждого метода замораживания – оттаивания в четырех точках мониторинга, шаг записи температурных значений – 2 минуты. Графики температуры приведены на рис. 4–6, значения температуры, полученные посредством численного расчета, показаны пунктирной линией, значения температуры, полученные по результатам натурного эксперимента, показаны сплошной линией.

Сравнение перепадов температуры между ядром кубов и поверхностью (нижней, верхней, боковой), полученных посредством численного расчета для различных режимов замораживания – оттаивания, приведено на рис. 7.

По данным, представленным на рис. 4–6, следует, что полученные по результатам расчета распределения температуры на поверхности и в глубине бетонных образцов-кубов достаточно близки к результатам измерений температуры в реальных образцах (рис. 1–3). На большинстве участков отличие не превышает 3–5 °С, хотя и достигает 10 °С в отдельных точках на отдельных этапах. При этом полученная по результатам расчетов наибольшая температурная нагрузка возникает при режиме «неполное погружение».

По результатам расчета теоретических значений температуры определены перепады темпера-

туры между ядром и поверхностью образцов-кубов (рис. 7), а также определены максимальные напряжения в них.

Результаты расчетов напряжений на поверхности и в ядре сечений кубов в момент наибольших перепадов температуры для рассмотренных режимов приведены на рис. 8. На рисунке желтым и красным цветами выделены области растягивающих напряжений, зеленым и синим цветами – области сжимающих напряжений. Визуализация результатов расчетов программой выполняется в виде изополей изменения напряжений от максимального до минимального значений, поэтому для каждого из рассмотренных режимов характер изополей практически одинаковый, изменяются значения максимальных растягивающих и сжимающих напряжений. Поэтому на рис. 8 один раз приведен характер изополей и приведены диапазоны изменения напряжений для каждого из режимов.

По данным, представленным на рис. 8б, следует, что растягивающие напряжения на поверхности бетона образца-куба достигают максимальных значений 1,07 МПа. Полученное значение практически совпало с расчетной прочностью бетона на растяжение $R_{bt} = 1,05$ МПа, отличие составляет менее 2%. Трещины на поверхности бетона не образуются.

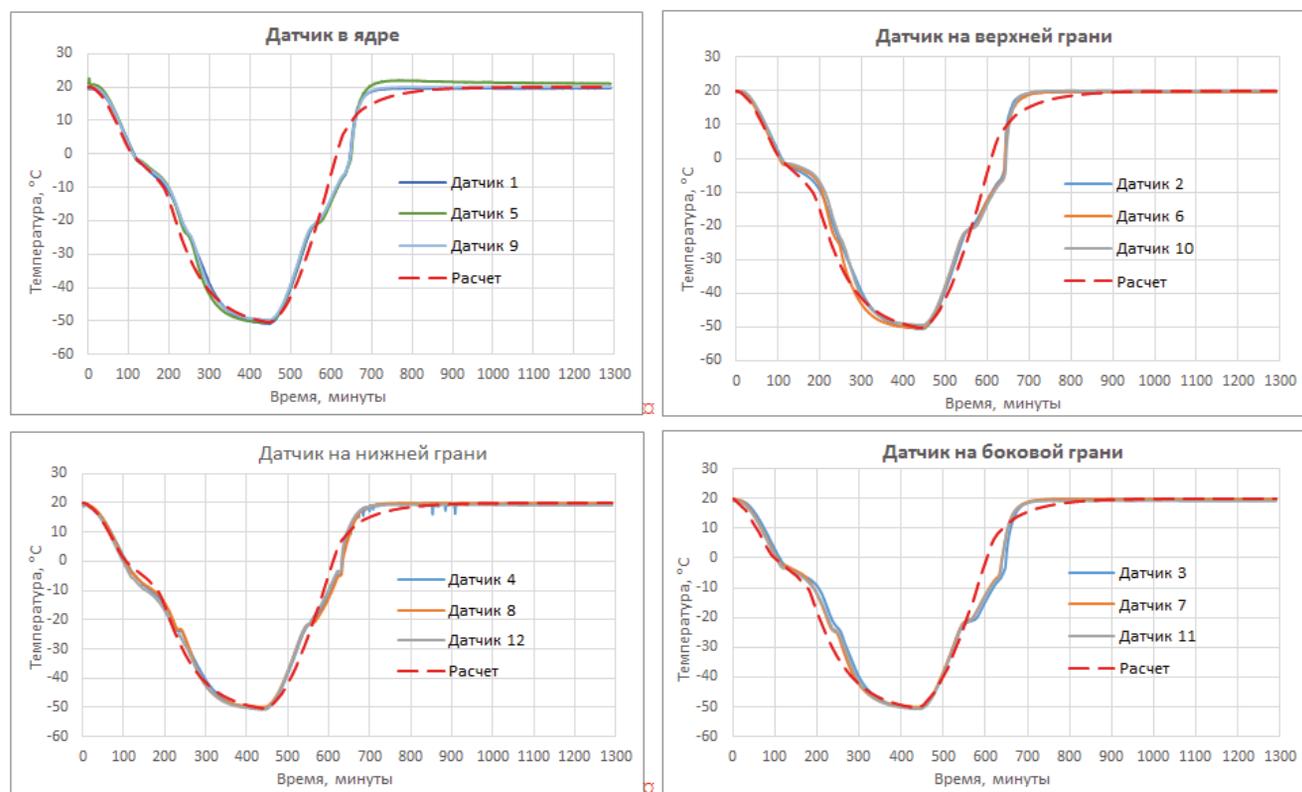


Рис. 4. Температурные графики эксперимента «полное погружение»
 Fig. 4. Temperature graphs of the "full immersion" experiment

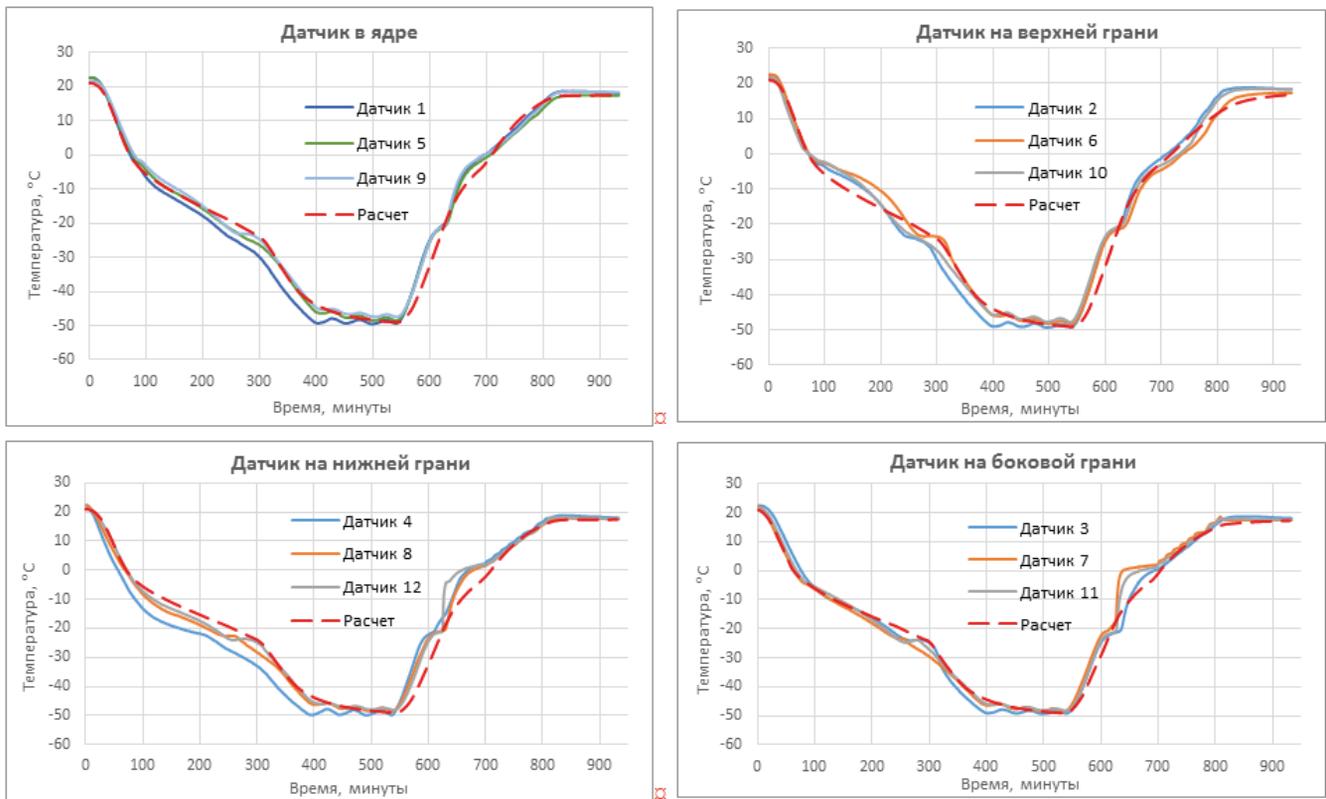


Рис. 5. Температурные графики эксперимента «неполное погружение (раствор)»
 Fig. 5. Temperature graphs of the "incomplete immersion (solution)" experiment

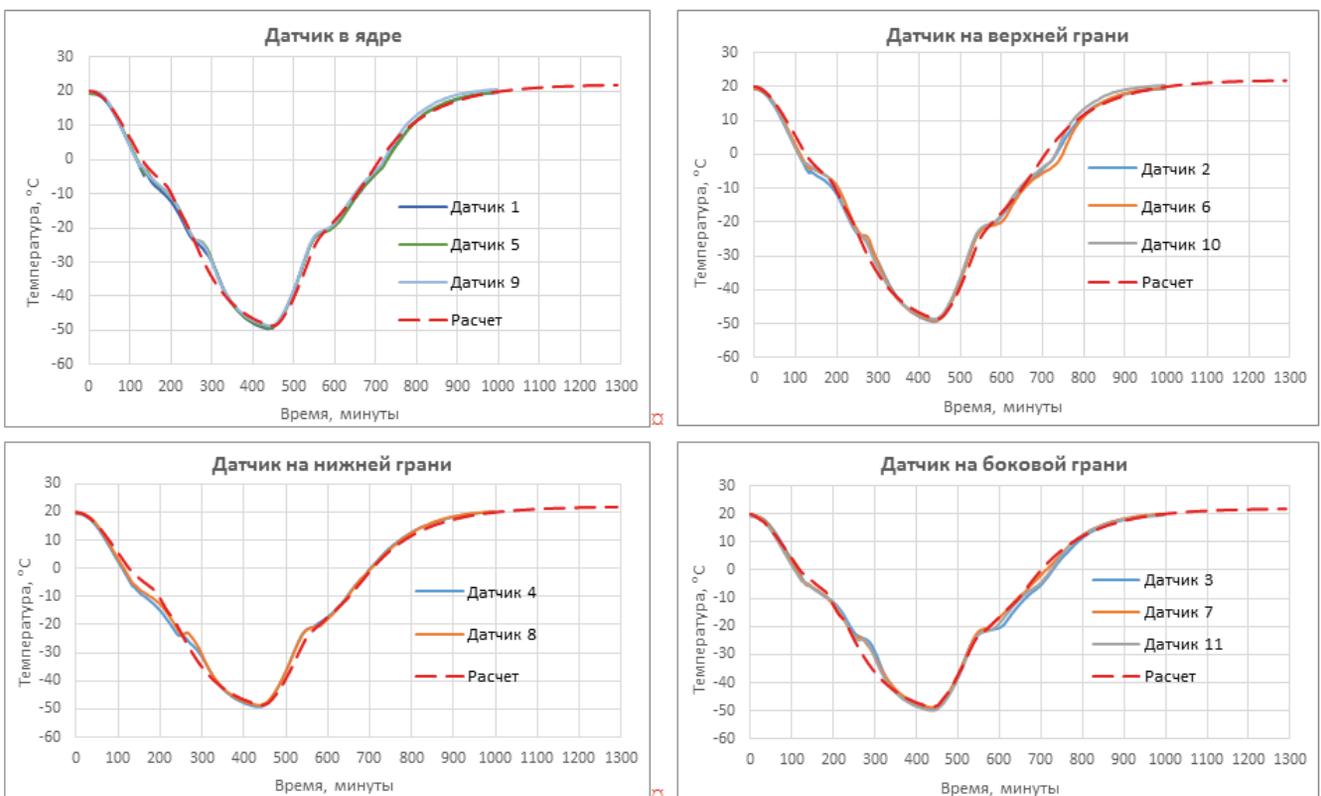
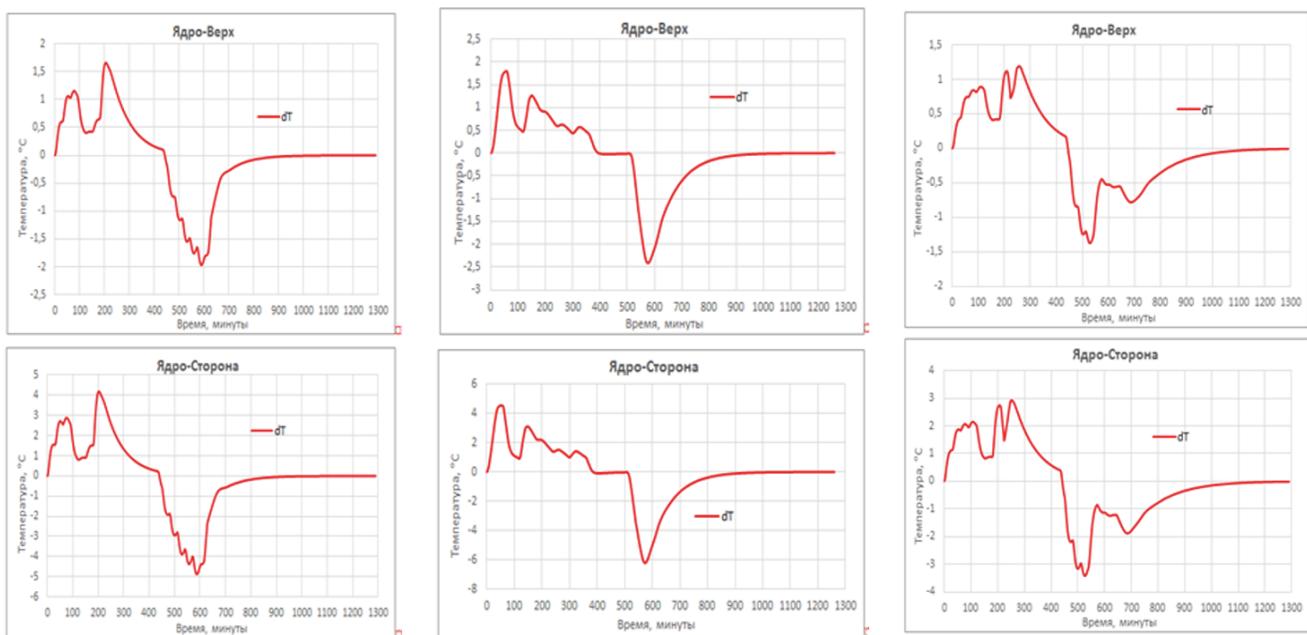


Рис. 6. Температурные графики эксперимента «воздушное оттаивание»
 Fig. 6. Temperature graphs of the "air thawing" experiment



а (a) **б (b)** **в (c)**
Рис. 7. Разница температурных полей эксперимента «полное погружение» (а), «неполное погружение» (б) и «воздушное оттаивание» (в)

Fig. 7. The difference in the temperature fields of the experiment "full immersion" (a), "incomplete immersion" (b) and "air thawing" (c)

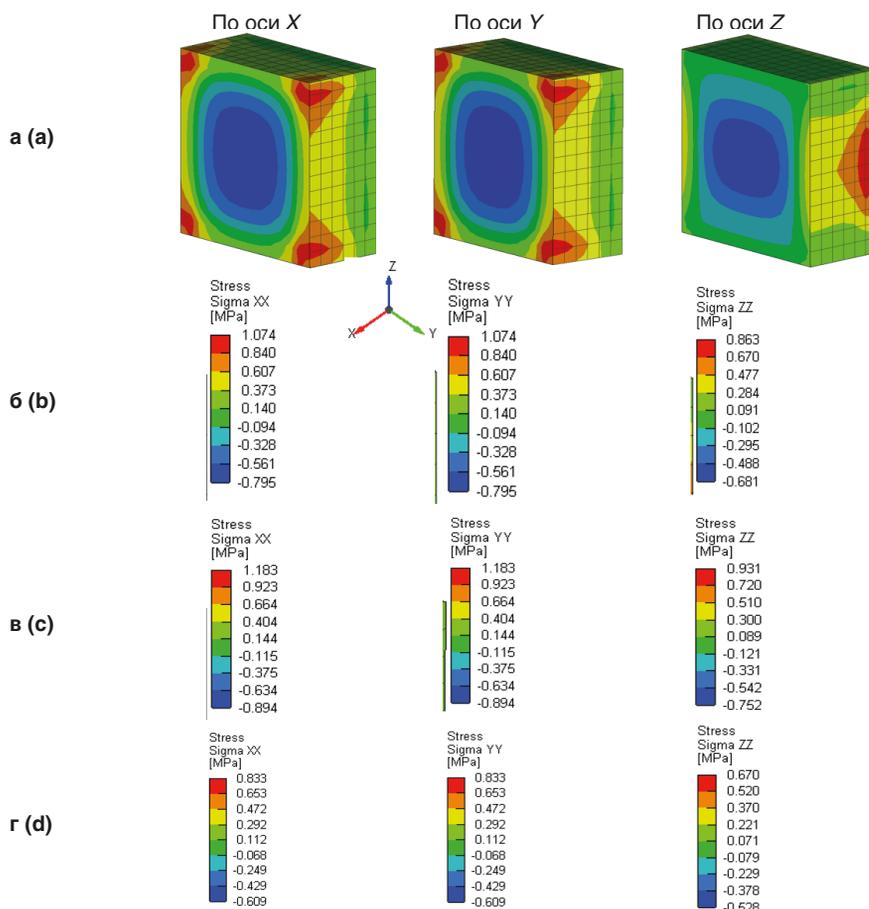


Рис. 8. Характер изменения изополей (а) и значения максимальных растягивающих и сжимающих напряжений эксперимента для режимов «полное погружение» (б), «неполное погружение» (в) и «воздушное оттаивание» (г)

Fig. 8. The nature of the change in the isofields (a) and the values of the maximum tensile and compressive stresses of the experiment for the modes "full immersion" (b), "incomplete immersion" (c) and "air thawing" (d)

По данным, представленным на рис. 8в, следует, что растягивающие напряжения на поверхности бетона образца-куба достигают максимальных значений 1,18 МПа. Полученное значение превышает расчетную прочность бетона на растяжение для бетона класса В25, согласно СП 63.13330.2018 [6], $R_{bt} = 1,05$ МПа. На поверхности бетона, вдоль вертикальных граней возможно образование трещин вследствие растяжения бетона.

По данным, представленным на рис. 8г, следует, что растягивающие напряжения на поверхности бетона образца-куба достигают максимальных значений 0,83 МПа. Полученное значение ниже расчетной прочности бетона на растяжение для бетона класса В25, согласно СП 63.13330.2018 [6], $R_{bt} = 1,05$ МПа. Трещины на поверхности бетона не образуются.

Установлено, что при большинстве режимов замораживания и оттаивания трещины не образуются, исключение составляет режим с неполным погружением емкостей с образцами в раствор при оттаивании, при котором на стадии замораживания и оттаивания возможно появление волосяных трещин (рис. 9).

Полученные по результатам расчета значения ниже предельно допустимых характеризуют качественное отличие растягивающих напряжений на поверхности образцов для режима «неполное погружение» от остальных режимов замораживания и оттаивания.

Сравнение скорости подъема температуры в момент оттаивания, растягивающих напряжений, образующихся в бетоне во время эксперимента, наличие трещин на поверхности и время полного цикла замораживания и оттаивания приведены в сводной табл. 2.

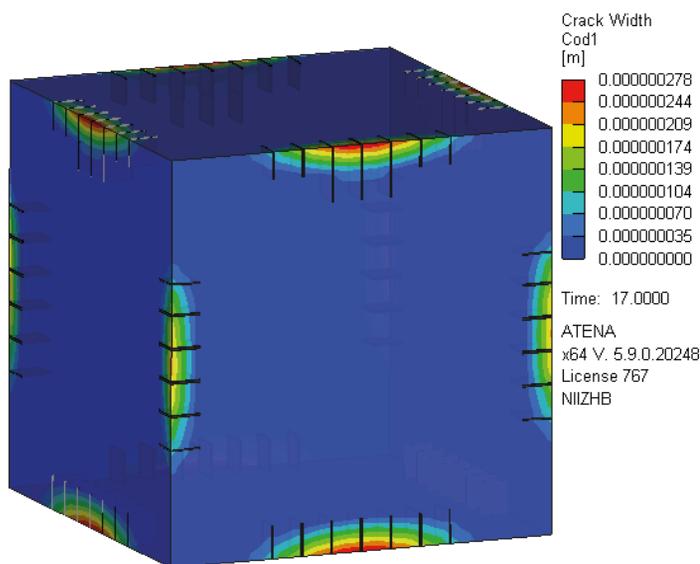


Рис. 9. Зоны трещинообразования для режима «неполное погружение (раствор)»
 Fig. 9. Crack formation zones for the "incomplete immersion (solution)" mode

Таблица 2
 Table 2

Сводная таблица по расчетному анализу
 Summary table for computational analysis

Режим оттаивания	Скорость оттаивания, °С/час	Перепад температуры «ядро – поверхность», °С	Растягивающие напряжения, МПа	Наличие трещин на поверхности бетона контрольного образца	Длительность цикла, ч
Воздушное оттаивание	14	3,0	0,833	Трещины не образуются	14,5
Неполное погружение (раствор)	25	4,5	1,183	Возможно образование трещин	14,5
Полное погружение (раствор)	19	4,2	1,074	Трещины не образуются	13,0

Выводы

1. Выполнен численный расчет процесса замораживания и оттаивания бетонных образцов в процессе испытания на морозостойкость ускоренным третьим методом по ГОСТ 10060-2012 (с Изменением № 1) [2] в программном комплексе ATENA. Пространственная модель повторяла геометрию образцов-кубов, характеристики материалов и температурно-влажностные условия эксперимента.

2. Натурный эксперимент выполнен по трем оптимизированным и отрегулированным режимам согласно ГОСТ 10060-2012 [2]. По результатам расчета теоретических значений температуры определены перепады температуры между ядром и поверхностью кубов, а также определены максимальные растягивающие напряжения на их поверхности в момент наибольших перепадов температуры.

3. Установлено, что оттаивание при неполном погружении образцов в раствор может вызывать качественное отличие состояния поверхности образцов бетона от остальных рассмотренных способов оттаивания – при воздушном оттаивании или при оттаивании после замораживания в специальной ванне в условиях полного погружения образцов – вследствие наличия наибольших из всех рассмотренных режимов растягивающих напряжений и возможности образования поверхностных температурных трещин на гранях кубов в процессе замораживания.

4. Численный расчет ТНС испытываемых образцов в процессе замораживания и различных режимов оттаивания при определении морозостойкости бетона ускоренным третьим методом подтвердил результаты экспериментальных лабораторных работ и показал, что режим оттаивания при неполном погружении емкостей с образцами в раствор качественно отличается от остальных рассмотренных способов оттаивания и является наиболее «жестким» вследствие возможности образования поверхностных трещин на бетонной поверхности образцов в процессе испытания.

5. Изменение методики проведения испытаний бетона на морозостойкость, включая способы оттаивания после замораживания при неполном погружении емкостей с образцами в раствор или при обдуве емкостей с образцами теплым воздухом, может стать причиной недостоверной оценки качества бетона, что в реальных условиях приведет к снижению безопасности объектов строительства.

Заключение

В работе применены численные расчеты ТНС испытываемых образцов-кубов для объяснения результатов экспериментальных работ по морозостойкости бетона.

Так как процесс морозного разрушения бетона заключается в постепенном образовании микротрещин, их накоплении и объединении, в дальнейшем, по мере накопления экспериментальных данных, воз-

можно применение численных расчетов ТНС бетона в процессе замораживания для прогнозирования морозостойкости бетона.

Развитие применения численных расчетов позволит на стадии подбора состава бетона оценить влияние изменения характеристик бетонной смеси (плотности, прочности, соотношения прочности на сжатие и прочности на растяжение и др.) и выполнить качественную оценку изменения морозостойкости бетона в зависимости от состава, в том числе бетонов особо низкой проницаемости и повышенной морозостойкости/морозосолеустойкости.

Список литературы

1. Розенталь Н.К., Чехний Г.В. Анализ методов определения морозостойкости бетона // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2023. № 3 (38). С. 128–142. DOI: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3\(38\)-128-142](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-128-142). EDN: VDKWWY.
2. ГОСТ 10060-2012. Бетоны. Методы определения морозостойкости (с Изменением № 1). Москва: Стандартинформ, 2014.
3. Červenka V., Jendele L., Červenka J. ATENA Program Documentation. Part 1. Theory. Part 3-2 Example Manual. Prague, 2021.
4. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. Москва, 2012.
5. Руководство по прогреву бетона в монолитных конструкциях. РААСН, НИИЖБ. Москва, 2005.
6. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. Москва, 2018.

References

1. Rozental N.K., Chekhonii G.V. Analysis of test methods for frost resistance of concrete. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2023, no. 3 (38), pp. 128–142. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3\(38\)-128-142](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-128-142). EDN: VDKWWY.
2. State Standard 10060-2012. Concretes. Methods for determination of frost-resistance (with Change No. 1). Moscow: Standartinform Publ., 2014. (In Russian).
3. Červenka V., Jendele L., Červenka J. ATENA Program Documentation. Part 1. Theory. Part 3-2 Example Manual. Prague, 2021.
4. SP 50.13330.2012. Thermal performance of the buildings. Updated version of SNiP 23-02-2003. Moscow, 2012. (In Russian).
5. Guidelines for concrete heating in cast-in-situ structures. RAACS, NIIZHB. Moscow, 2005. (In Russian).
6. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. Updated version of SNiP 52-01-2003. Moscow, 2018. (In Russian).

**Информация об авторах /
Information about the authors**

Андрей Викторович Бучкин, канд. техн. наук, заместитель заведующего лабораторией коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: andibuch@inbox.ru

тел.: +7 (499) 174-76-81

Andrey V. Buchkin, Cand. Sci. (Engineering), Deputy Head, Laboratory of Corrosion and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: andibuch@inbox.ru

tel.: +7 (499) 174-76-81

Галина Васильевна Чехний[✉], канд. техн. наук, заведующий сектором коррозии бетона лаборатории коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: chehniy@mail.ru

тел.: +7 (499) 174-76-97

Galina V. Chekhniy[✉], Cand. Sci. (Engineering), Head of Concrete Corrosion Section, Laboratory of Corrosion and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: chehniy@mail.ru

tel.: +7 (499) 174-76-97

Николай Константинович Розенталь, д-р техн. наук, профессор кафедры «Строительные сооружения, конструкции и материалы», АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: rosental08@mail.ru

Nikolai K. Rozental, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Department of Buildings, Structures, and Materials, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: rosental08@mail.ru

Сергей Александрович Орехов, научный сотрудник, сектор коррозии бетона, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: sirius_m16@mail.ru

Sergey A. Orekhov, Researcher, Concrete Corrosion Section, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: sirius_m16@mail.ru

Сергей Ильич Иванов, канд. техн. наук, заведующий лабораторией напрягающих бетонов и самонапряженных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Sergey I. Ivanov, Cand. Sci. (Engineering), Head, Laboratory of Prestressed Concretes and Self-Stressed Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

Александр Игоревич Пастухов, инженер лаборатории напрягающих бетонов и самонапряженных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Alexander I. Pastukhov, Engineer, Laboratory of Prestressed Concretes and Self-Stressed Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

[✉] Автор, ответственный за переписку / Corresponding author