



УДК 624.3

DOI: 10.22227/2949-1622.2024.4.44-53

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH ARTICLE

## Деформирование бетона раннего замораживания при оценке НДС железобетонных конструкций

Д.С. Дехтерев<sup>1,2\*</sup>, Д.В. Елифантьев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Москва, Российская Федерация;

<sup>2</sup> Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация

\* 9201177874@mail.ru

**Ключевые слова:** раннее замораживание, нелинейная деформационная модель, диаграмма деформирования, образцы-кубы, критическая прочность бетона

### История статьи

Поступила в редакцию: 30.10.2024

Доработана: 05.11.2024

Принята к публикации: 07.11.2024

### Для цитирования

Дехтерев Д.С., Елифантьев Д.В. Деформирование бетона раннего замораживания при оценке НДС железобетонных конструкций // Железобетонные конструкции. 2024. Т. 8. № 4. С. 44–53.

**Аннотация.** При производстве работ по бетонированию конструкций в условиях отрицательных температур часто возникает ситуация, при которой нарушена технология прогрева бетонной смеси при ее схватывании и твердении. Принято указывать в проекте минимальную (критическую) прочность бетона перед его замораживанием для обеспечения набора прочности до марочных показателей. Низкая прочность бетона к моменту замораживания является основанием для демонтажа конструкции или ее усиления. Как следствие — снижение рентабельности строительства и увеличение сроков производства работ. В работе приведена методика построения диаграммы деформирования образцов бетона после раннего замораживания бетонной смеси с целью использования ее при оценке НДС конструкций с низкой прочностью. Для оценки влияния сроков раннего замораживания на конечную прочность бетона и построения деформационных кривых проведены испытания на сжатие образцов-кубов с ребром 100 мм с различным сроком выдерживания бетона перед его замораживанием. Приведена методика учета полученных деформационных кривых для оценки НДС конструкций на основе нелинейной деформационной модели. Подготовлена исходная информация для разработки программы расчета НДС по полученной методике. Полученные результаты позволяют выполнять оценку технического состояния конструкций после раннего замораживания бетонной смеси с учетом измененных деформационных характеристик бетона участков с ранним замораживанием бетонной смеси.

*Денис Сергеевич Дехтерев*, кандидат технических наук, доцент кафедры Железобетонные и каменные конструкции, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; доцент кафедры Строительство зданий и сооружений, Ярославский государственный технический университет, 150999, г. Ярославль, Московский пр-т, д. 88; eLIBRARY SPIN-код: 2324-3558, Scopus: 57204418740, ORCID: 0000-0002-8297-8955, E-mail: 9201177874@mail.ru

*Дмитрий Владимирович Елифантьев*, преподаватель кафедры Железобетонные и каменные конструкции, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; E-mail: gbk@mgsu.ru

© Дехтерев Д.С., Елифантьев Д.В., 2024



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

## Deformation of Early Freezing Concrete in the Assessment Stress-Strain State of Reinforced Concrete Structures

D.S. Dekhterev<sup>1,2\*</sup>, D.V. Elifantiev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russian Federation;

<sup>2</sup> Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

\* 9201177874@mail.ru

**Keywords:** early freezing, nonlinear deformation model, stress-strain diagram, cube specimens, critical strength of concrete

### Article history

Received: 30.10.2024

Revised: 05.11.2024

Accepted: 07.11.2024

### For citation

Dekhterev D.S., Elifantiev D.V. Deformation of Early Freezing Concrete in the Assessment Stress-Strain State of Reinforced Concrete Structures. *Reinforced Concrete Structures*. 2024; 4(8):44-53.

**Abstract.** When performing concreting works for structures in sub-zero temperatures, a situation often arises in which the technology of heating the concrete mix during its setting and hardening is violated. It is customary to specify in the project the minimum (critical) strength of concrete before its freezing to ensure the strength gain to the brand indicators. Low strength of concrete at the time of freezing is the basis for dismantling the structure or reinforcing it. As a result — a decrease in the profitability of construction and an increase in the terms of production works. The paper presents a technique for constructing a deformation diagram of concrete samples after early freezing of the concrete mix in order to use it to assess the stress-strain state of structures with low strength. To assess the effect of early freezing times on the final strength of concrete and to plot deformation curves, compression tests were carried out on cube samples with an edge of 100 mm with different periods of curing of concrete before its freezing. A technique is presented for taking into account the obtained deformation curves for assessing the stress-strain state of structures based on a nonlinear deformation model. Initial information has been prepared for developing a program for calculating the SSS using the obtained methodology. The results obtained allow for assessing the technical condition of structures after early freezing of the concrete mix, taking into account the changed deformation characteristics of concrete in areas with early freezing of the concrete mix.

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальной задачей монолитного домостроения, способствующего экономическому развитию Российской Федерации, является совершенствование методов зимнего бетонирования. Как правило, укладка бетонной смеси в зимний период выполняется с прогревом, что сопровождается повышенными энергозатратами. Возможность производства бетонных работ в условиях длительного периода отрицательных температур без использования электропрогрева или с его ограниченным применением — важный вопрос развития отрасли.

Согласно действующим нормам, возможно замораживание бетона до достижения им марочной прочности, однако прочность бетона к моменту замораживания не должна быть меньше минимально допустимой. Нарушение данного требования приводит к снижению конечной прочности бетона в конструкции, снижению ее несущей способности и надежности [1, 2]. На строительной площадке выполнение данного требования достигается, как правило, путем прогрева бетонной смеси до набора бетоном минимально необходимой прочности.

*Denis S. Dekhterev*, Candidate of Technical Sciences, Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Associate Professor, Department of Building and Structures Construction, Yaroslavl State Technical University, 88 Moskovsky Prospekt, Yaroslavl, 150999, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 2324-3558, Scopus: 57204418740, ORCID: 0000-0002-8297-8955, E-mail: 9201177874@mail.ru

*Dmitry V. Elifantiev*, Lecturer, Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, E-mail: gbk@mgsu.ru

Для массивных конструкций применяется метод «термоса», заключающийся в теплоизоляции конструкции и подогреве бетонной смеси перед ее укладкой [3, 4]. Дальнейшее развитие технологий монолитного домостроения является актуальной задачей, позволяющей экономить строительные ресурсы и минимизировать сроки строительства зданий.

В условиях строительной площадки трудно, а иногда и невозможно, обеспечить правильный уход за бетоном в зимний период. Часто возникает ситуация, при которой набор прочности бетона в условиях отрицательных температур обеспечивается только электропрогревом, а при отсутствии резервирования электроснабжения, нарушениях при устройстве греющих контуров электропрогрева, неправильном подборе трансформатора станция прогрева может выйти из строя. В этом случае бетонная смесь замерзает до набора критической прочности и конечная прочность бетона неизвестна. Твердение бетона в условиях отрицательных температур крайне медленное и к моменту набора бетоном конечной прочности в здании может быть устроено несколько новых этажей. Это приводит к сложному вопросу демонтажа или усиления железобетонной конструкции на участках с ранним замораживанием, расположенных внутри каркаса здания, с соответствующим повышением сроков и себестоимости строительства.

Начиная с 1930 гг. проводились активные разработки современных методов бетонирования в зимний период времени, что было обусловлено высокими объемами строительно-монтажных работ в этот период. Первые объекты с железобетонным каркасом в этот период возводились с устройством «тепляков», что требовало значительных энергозатрат. Позднее стал активно внедряться метод «термоса» с применением предварительно прогретых материалов. Над развитием методов зимнего бетонирования трудились ведущие научные организации страны: ГИС, ЦНИПС, НИИЖБ, ЦНИИОМТП, ЦНИИСК и др. В 1934 г. Б.Г. Скрамтаевым и В.С. Лукьяновым были предложены способы расчета скорости охлаждения бетона в конструкциях. Внедрение электропрогрева при бетонировании конструкций началось уже в послевоенный период. А.С. Арбеньевым в 1962 г. был предложен метод предварительного электроразогрева бетонной смеси до температуры 60–80 °С.

Наибольшее развитие технология зимнего бетонирования получила в работах С.А. Миронова [5]. По результатам его работы установлено, что при замерзании бетонной смеси образуются те же продукты гидратации, что и при нормальном твердении, только с более дисперсной структурой. Он определил критический возраст бетона (7 суток нормального твердения), при котором конечная прочность бетона не получит существенного снижения. Исследованием раннего замораживания бетона занимались В.Н. Сизов, К.М. Мозголёв, С.Г. Головнёв, О.С. Иванова, Метина Хусем (Metin Husem), Сергата Гозуток (Serhat Gozutok), Рональд Барг (Ronald G. Burg), Н.А. Кудайбергенова, Ш.М. Рахимбаев, И.В. Хомякова, В.Н. Ярмаковский, О.В. Тараканов, А.Г. Тамразян, А.Х. Байбурин [6–27] и др. Также имеются исследования, подтверждающие, что раннее замораживание бетона не приводит к снижению его прочности. Большинство работ связано с изучением структуры бетона, оценкой влияния раннего замораживания на его конечную прочность. Недостаточно исследованы вопросы, связанные с определением расчетных характеристик бетона после раннего замораживания. Разработка методики расчета конструкции из бетона с пониженными прочностными и деформационными характеристиками является актуальной задачей, способствующей снижению сроков строительства и повышению его эффективности.

## МЕТОД

Оценка влияния раннего замораживания на прочностные и деформационные свойства бетона проводилась при испытании образцов-кубов бетона с ребром 100 мм. Испытание выполнено на гидравлическом прессе ПГМ-500 МГ4. Всего было изготовлено и испытано 22 бетонных образца из бетона класса В25. Для построения кривой деформирования к образцам

была закреплена металлическая траверса с установленными датчиками часового типа с точностью измерений 0,001 мм (рис. 1).



**Рис. 1.** Стальная траверса для закрепления индикаторов часового типа на бетонном образце  
**Fig. 1.** Steel crossbeam for fixing clock-type indicators on a concrete specimen

Базовый состав тяжелого бетона был подобран с использованием следующих компонентов:

- мелкий заполнитель — песок:  $M_{кр} = 2,01$ ;  $\rho_{нас} = 1650 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_{ист} = 2600 \text{ кг/м}^3$ ;
- крупный заполнитель — щебень:  $\rho_{нас} = 1400 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_{ист} = 2590 \text{ кг/м}^3$ ; фракция 5–20 мм;
- вяжущее — портландцемент:  $\rho_{нас} = 1150 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_{ист} = 3150 \text{ кг/м}^3$ ;  $R_c = 42,5 \text{ МПа}$  (активность).

Расход материалов на один лабораторный образец составил: Ц = 0,357 кг; В = 0,20 кг; Щ = 1,17 кг; П = 0,613 кг.

Замораживание бетонных образцов после заливки проводилось через 4, 8, 12, 24, 48, 72, 96, 120, 144 ч выдерживания в камере нормального твердения (рис. 2). Для замораживания образцы бетона помещались в морозильную камеру на 24 ч с температурой  $-24 \text{ }^\circ\text{C}$ . После оттаивания в течение 1 суток образцы помещались в пропарочную камеру на 6 суток, после чего проводилось испытание на сжатие с целью определения конечной прочности бетона.

По отдельной методике проведено замораживание образцов бетона непосредственно после заливки, для чего использовались охлажденные компоненты бетонной смеси и замороженные до температуры  $-24 \text{ }^\circ\text{C}$  формы для заливки. Таким образом моделировалась ситуация, когда укладка бетонной смеси на объекте проводится в условиях отрицательных температур в замороженную опалубку с использованием сильно охлажденной бетонной смеси. В морозильной камере для ускорения замораживания такой бетонной смеси применен дополнительный обдув, имитирующий реальные производственные условия строительной площадки в зимний период времени. Сравнение результатов испытания образцов бетона с ранним замораживанием проводилось с образцами без замораживания, для определения конечной прочности которых они также помещались в пропарочную камеру через 14 суток нормального твердения.

В ходе испытания для построения диаграммы деформирования фиксировались отсчеты по индикаторам и бесконтактное измерение деформаций по предварительно нанесенным на образец маркам. Индикаторы часового типа и камеры с высоким разрешением устанавливались по трем сторонам образца с целью определения средних значений деформаций.



**Рис. 2.** Образцы в камере нормального твердения  
**Fig. 2.** Specimens in the normal curing chamber

Полученные диаграммы деформирования бетона использованы для оценки напряженно-деформированного состояния конструкций по нелинейной деформационной модели согласно п. 8.1.20 СП 63.13330.2018. В этом случае условия равновесия сечения записываются в виде:

$$\begin{aligned} M_x &= \sum_i \sigma_{bi} \cdot A_{bi} \cdot Z_{bxi} + \sum_j \sigma_{sj} \cdot A_{sj} \cdot Z_{sxj}; \\ M_y &= \sum_i \sigma_{bi} \cdot A_{bi} \cdot Z_{byi} + \sum_j \sigma_{sj} \cdot A_{sj} \cdot Z_{syj}; \\ N &= \sum_i \sigma_{bi} \cdot A_{bi} + \sum_j \sigma_{sj} \cdot A_{sj}; \end{aligned} \quad (1)$$

Выражения для определения деформаций по сечению:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{bi} &= \varepsilon_0 + \frac{1}{r_x} \cdot Z_{bxi} + \frac{1}{r_y} \cdot Z_{byi}; \\ \varepsilon_{sj} &= \varepsilon_0 + \frac{1}{r_x} \cdot Z_{sxj} + \frac{1}{r_y} \cdot Z_{syj}; \end{aligned} \quad (2)$$

Зависимости, определяющие напряжения и деформации:

$$\begin{aligned} \sigma_{bi} &= E_b \cdot \nu_{bi} \cdot \varepsilon_{bi}; \\ \sigma_{sj} &= E_{sj} \cdot \nu_{sj} \cdot \varepsilon_{sj}; \end{aligned} \quad (3)$$

Полученные экспериментальные кривые деформирования для бетона с ранним замораживанием использованы для определения коэффициентов приведения  $\nu_{bi}$ . Приведенная модель является итерационной, и для ее применения нагрузка на образец должна задаваться ступенями. На каждой ступени нагрузки определяется распределение деформаций по сечению и вычисляются напряжения. В случае превышения предельно допустимых значений относительных деформаций в бетоне или арматуре участок сечения исключается из расчета:

$$\begin{aligned} |\varepsilon_{b,\max}| &\leq \varepsilon_{b,ult}; \\ \varepsilon_{s,\max} &\leq \varepsilon_{s,ult}, \end{aligned} \quad (4)$$

Расчет произвольного сечения по нелинейной деформационной модели с использованием экспериментальных кривых деформирования проводился по следующей методике:

1. Определяется требуемая деформационная кривая в зависимости от периода замораживания бетонной смеси согласно журналу бетонных работ на объекте.

2. Вычисляются значения момента  $M_x$ ,  $M_y$  от нагрузки в исследуемом сечении расчетной модели конструкции.

3. Расчетное сечение разбивается на заданное число слоев, значение момента в сечении принимается как часть (1/10 или менее) от найденного по расчетной модели значения момента для моделирования итерационного процесса нагружения.

4. Для первого шага нагружения в каждом слое сечения проводится вычисление кривизны и деформаций по формулам (2) с использованием коэффициентов приведения  $\nu_{bi}$ , найденных из анализа деформационных кривых по формулам (3).

5. В случае превышения предельных деформаций растянутого бетона в слое фиксируется образование трещины и слой исключается из расчета на следующем шаге нагружения.

6. Далее проводятся аналогичные вычисления для второго и последующего шага нагружения. На каждом шаге проводится повторное вычисление коэффициентов приведения, кривизны и деформаций в сечении. В случае превышения предельных деформаций сжатого бетона или предельных деформаций арматуры на растяжение фиксируется разрушение сечения конструкции. Если разрушение произошло до выполнения последнего шага нагружения, то в расчетном сечении конструкции выявлен дефицит несущей способности вследствие раннего замораживания бетонной смеси.

Для автоматической реализации предложенного алгоритма разработана программа NDM 2.1 с использованием языка программирования VBA и встроенной математической библиотеки функций MS EXCEL (рис. 3). С целью упрощения расчета сечение разбивалось на горизонтальные полосы и расчет сечения проводился из условия вертикальной симметрии напряжений и деформаций.

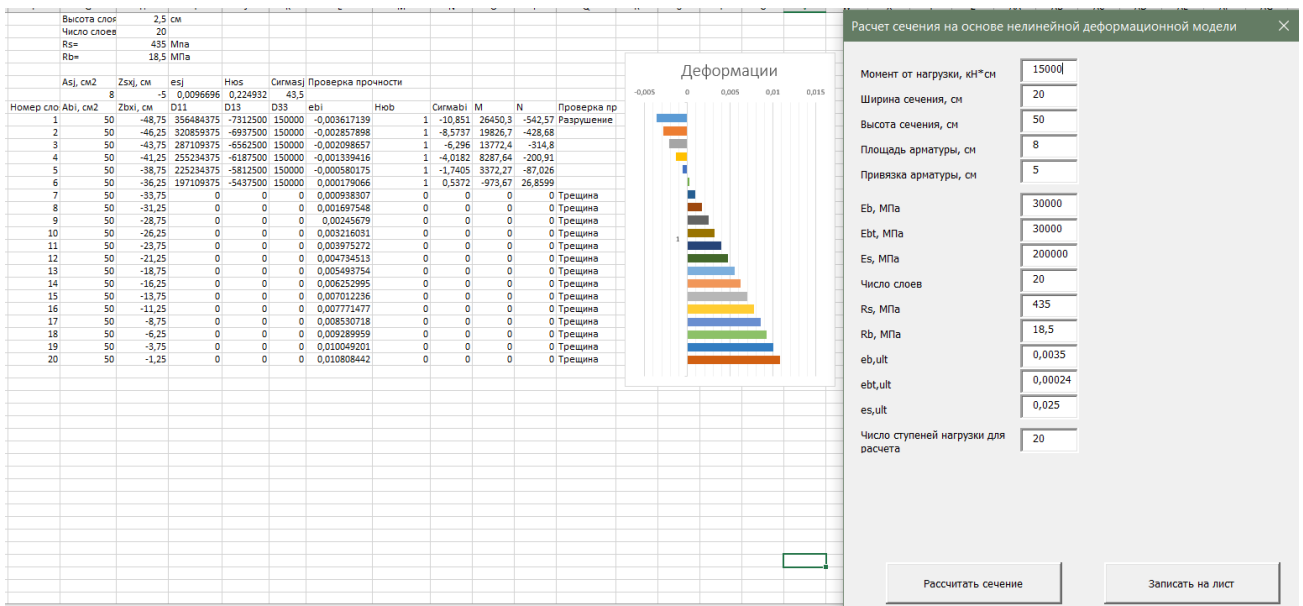


Рис. 3. Рабочее окно программы NDM 2.1 с формой ввода исходных данных

Fig. 3. Working window of the NDM 2.1 program with the form of input data entry

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам испытания образцов после раннего замораживания получены следующие данные конечной прочности бетона (таблица).

Результаты испытаний образцов на сжатие  
Results of compression tests on specimens

Номер образца Specimen	Количество времени с момента заливки до замораживания, ч Amount of time from pouring to freezing, hr	Разрушающая нагрузка, кН Failure load, kN	Прочность на сжатие, МПа Compressive strength, MPa
КК	–	354,6	33,7
		344,3	32,7
БК0	0	172,4	16,4
		148,6	14,1
БК4	4	313,0	29,73
		281,7	26,76
БК8	8	317,4	30,16
		308,6	29,31
БК12	12	332,3	31,57
		373,8	35,51
БК24	24	275,3	26,15
		332,2	31,56
БК48	48	361,4	34,34
		319,1	30,32
БК72	72	347,6	33,02
		385,5	36,62
БК96	96	343,5	32,63
		330,3	31,38
БК120	120	358,8	34,08
		336,8	31,99
БК144	144	312,2	29,56
		318,8	30,28

По результатам испытания образцов построены экспериментальные кривые деформирования бетона (рис. 4).

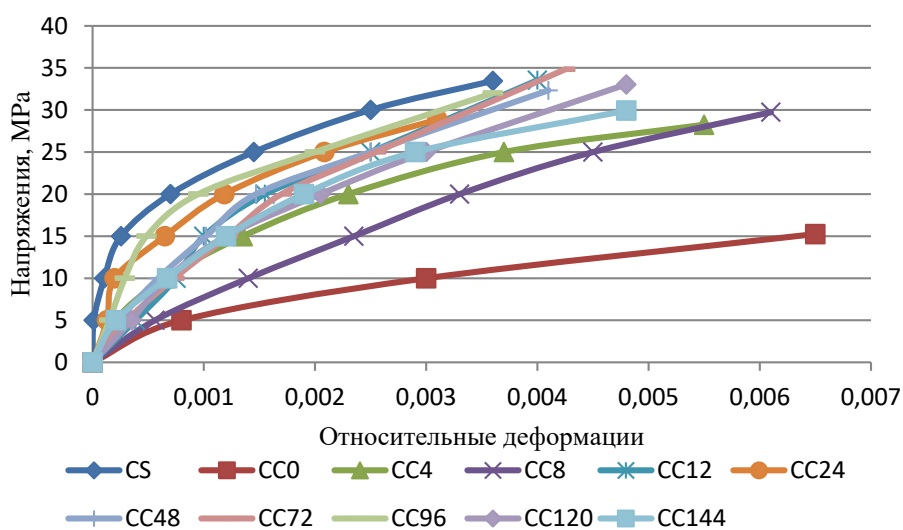


Рис. 4. Экспериментальные деформационные кривые по результатам испытания опытных образцов

Fig. 4. Experimental deformation curves based on the test results of prototypes

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов испытания образцов бетона на сжатие установлено, что несмотря на ранние сроки замораживания существенного снижения конечной прочности образцов не произошло. Наибольшее снижение зафиксировано для образцов СС4 — 15 % и СС24 — 13 % от образцов, твердеющих в нормальных условиях. Часть образцов показала повышенную прочность по сравнению с образцами, твердеющими в нормальных условиях. И только образцы, помещенные в морозильную камеру непосредственно после заливки, показали существенное снижение прочности на сжатие (более 50 %). Для этих образцов зафиксировано изменение геометрии образца (увеличение в объеме на 4 %), связанное с замерзанием воды в бетонной смеси. После оттаивания бетонная смесь образца по-прежнему имела нулевую прочность, поэтому образцы более суток после оттаивания выдерживались в формах.

По результатам исследований раннего замораживания образцов можно сделать выводы, что критическая прочность бетона, указанная в нормативной документации, имеет ограниченное значение на конечную прочность бетона. Важно обеспечить схватывание бетона до его замерзания, выполнив его укрытие непосредственно после заливки, а также обеспечить положительную температуру опалубки при заливке или сразу после нее, не допуская заливки охлажденной бетонной смеси в опалубку с отрицательной температурой. При нарушении данного правила происходит замерзание бетона в месте контакта с опалубкой, что приводит к разрушению поверхностного слоя бетона при ее демонтаже и появлению характерной выщербленной поверхности конструкции. При укладке в зимний период холодной бетонной смеси происходит замерзание внешней части конструкции, контактирующей с холодным воздухом. При этом внутренние части конструкции к моменту замерзания успевают набрать прочность. В этом случае при обследовании технического состояния здания фиксируется существенное снижение поверхностной прочности конструкции, требующей проведения ремонтных мероприятий поверхности. Для исключения данного дефекта рекомендуется применение предварительно разогретых бетонных смесей.

В случае выявления раннего замораживания бетона возможно выполнить оценку НДС конструкции по нелинейной деформационной модели с учетом найденных деформационных кривых. Оценка проводится для выявления необходимости демонтажа или усиления железобетонной конструкции в кратчайшие сроки, не допуская длительного перерыва в бетонировании. Это позволяет сокращать сроки и себестоимость строительства, что положительно сказывается на развитии отрасли.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dekhterev D.S.* Assessment of the reliability of bent reinforced concrete elements under corrosive effects // E3S Web of Conf. Volume 410, 2023 XXVI International Scientific Conference “Construction the Formation of Living Environment” (FORM-2023) Article Number 02029 Number of page(s) 8 Section Reliability of Buildings and Constructions. DOI: 10.1051/e3sconf/202341002029
2. *Дехтерев Д.С.* Аналитическая оценка весомости влияния конструкционных параметров стыков колонн каркасных зданий на надежность соединения // Строительство и реконструкция. 2019. № 2. С. 11–19. DOI: 10.33979/2073-7416-2019-82-2-11-19
3. *Дехтерев Д.С.* Критерии определения прочности бетона разрушающими методами по контрольным образцам // Перспективы науки. 2023. № 4 (163). С. 87–91.
4. *Дехтерев Д.С.* К оценке долговечности железобетонных конструкций на основе обследования инженерно-технического состояния зданий // Перспективы науки. 2022. № 5 (152). С. 78–81.
5. *Мионов С.А.* Теория и методы зимнего бетонирования. М. : Стройиздат, 1975. 404 с.
6. *Кудайбергенова Н.А., Чумадова Л.И., Ватин Н.И., Бакирова И.Г.и др.* Кинетика набора прочности бетона при раннем замораживании // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 2 (41). С. 7–17.



7. Сердюкова А.А., Рахимбаев Ш.М. Влияние отрицательных температур на твердение бетона // Бетон и железобетон. 2013. № 1. С. 52.
8. Попов В.М., Хомякова И.В. Особенности работы железобетонных конструкций в условиях замораживания и оттаивания // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 4. С. 241.
9. Карпенко Н.И., Ярмаковский В.Н., Карпенко С.Н., Кадиев Д.З. К диаграммам деформирования бетона под нагрузкой при действии температуры до  $-70$  °С в зависимости от его структурно-технологических характеристик // Строительные материалы. 2018. № 6. С. 13–19.
10. Yarmakovskiy V.N. Strength and deformation characteristics of concrete at low temperatures // Beton i zhelezobeton. 1971. No. 10.
11. Istomin A.D. The work of central-stretched reinforced concrete elements at negative temperature // Izyestiya vuzov. Tehnologiya tekstilnoy promyshlennosti. 2017. No. 2. Pp. 141–144.
12. Leonovich S.N. Strength of structural concrete during cyclic freezing-thawing from the position of fracture mechanics. Brest : BrGTU, 2006. 379 p.
13. Jia-Bao Yan, Jian Xie. Behaviours of reinforced concrete beams under low temperatures // Construction and Building Materials (China). 2017. No. 141. Pp. 410–425.
14. Rostasy F.S., Wiedemann G. Stress-strain-behaviour of concrete at extremely low temperature // Cement and Concrete Research (USA). 1980. Vol. 10. Pp. 565–572.
15. Тараканов О.В., Белякова Е.А., Тараканова Е.О. Оценка влияния раннего замораживания на прочность цементно-песчаных растворов // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. 2010. № 13. С. 110–117.
16. Cold Weather Concrete. TECHNICAL BULLETIN TB-01.06. W.R. Grace & Co.-Conn. 2006. Pp. 1–4.
17. Лагойда А.В. О массопереносе и замораживании бетона в раннем возрасте // Бетон и железобетон — избранные статьи. 1994. С. 7–10.
18. Cecconello I.V., Tutikian B. The influence of low temperature on the evolution of concrete strength // Rev. IBRACON Estrut. Mater. 2012. Vol. 5. No. 1. Pp. 3–8.
19. Husem M., Gozutok S. The effects of low temperature curing on the compressive strength of ordinary and high-performance concrete // Construction and Building Materials. 2005. Vol. 19. Issue 1. Pp. 49–53.
20. Красовский П.С. Исследования свойств бетонов, твердевших при отрицательных температурах // НТ отчет. Хабаровск, 1988. 92 с.
21. Fu Y.Y. Experimental Study on Freeze Thaw Resistance Concrete // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 830. Pp. 41–44.
22. Wang L.X., Shan X.T., Zhang Y.Q., Li Ch.Sh. и др. Experimental Study of Compression and Carbonation in Concrete Subjected to Freeze-Thaw Environment // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 887–888. Pp. 814–818.
23. Тринкер А.Б. Зимнее бетонирование и работы в условиях вечной мерзлоты // Технологии бетонов. 2013. № 2 (79). С. 42–44.
24. Мозгалева К.М., Головнев С.Г. Особенности раннего замораживания самоуплотняющихся бетонов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2012. № 38 (297). С. 43–45.
25. Румянцев Е.В., Соловьев В.Г., Байбурун А.Х. Исследование замерзания на прочность сцепления в бетонных швах при зимнем бетонировании // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2022. Т. 22. № 3. С. 61–70.
26. Тамразян А.Г. Исследование влияния местной низкой прочности бетона на несущую способность изгибаемых железобетонных балок // Железобетонные конструкции. 2024. Т. 5. № 1. С. 3–14.
27. Каприелов С.С., Гольденберг А.Л., Тамразян А.Г. О самозалечивании высокопрочного бетона, подвергнутого деструкции при циклическом замораживании // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. № 5 (371). С. 56–61.

## REFERENCES

1. Dekhterev D.S. Assessment of the reliability of bent reinforced concrete elements under corrosive effects. *E3S Web of Conf. Volume 410, 2023 XXVI International Scientific Conference "Construction the Formation of Living Environment" (FORM-2023) Article Number 02029 Number of page(s) 8 Section Reliability of Buildings and Constructions*. DOI: 10.1051/e3sconf/202341002029
2. Dekhterev D.S. Analiticheskaya otsenka vesomosti vliyaniya konstruktsionnykh parametrov stykov kolonn karasnykh zdaniy na nadezhnost' soyedineniya. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2019; 2:11-19. DOI: 10.33979/2073-7416-2019-82-2-11-19 (in Russian).
3. Dekhterev D.S. Kriterii opredeleniya prochnosti betona razrushayushchimi metodami po kontrol'nyim obraztsam. *Perspektivy nauki*. 2023; 4(163):87-91. (in Russian).
4. Dekhterev D.S. K otsenke dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstruktsiy na osnove obsledovaniya inzhenerno-tekhnicheskogo sostoyaniya zdaniy. *Perspektivy nauki*. 2022; 5(152):78-81. (in Russian).
5. Mironov S.A. *Teoriya i metody zimnego betonirovaniya*. Moscow, Stroyizdat, 1975; 404. (in Russian).
6. Kudaybergenova N.A., Chumadova L.I., Vatin N.I., Bakirova I.G. et al. Kinetika nabora prochnosti betona pri rannem zamorazhivanii. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy*. 2015; 2(41):7-17. (in Russian).
7. Serdyukova A.A., Rakhimbayev Sh.M. Vliyaniye otritsatel'nykh temperatur na tverdeniye betona. *Beton i zhelezobeton*. 2013; 1:52. (in Russian).
8. Popov V.M., Khomyakova I.V. Osobennosti raboty zhelezobetonnykh konstruktsiy v usloviyakh zamorazhivaniya i ottaivaniya. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2005; 4:241. (in Russian).
9. Karpenko N.I., Yarmakovskiy V.N., Karpenko S.N., Kadiyev D.Z. K diagrammam deformirovaniya betona pod nagruzkoy pri deystvii temperatury do  $-70$  °C v zavisimosti ot yego strukturno-tekhnologicheskikh kharakteristik. *Stroitel'nyye materialy*. 2018; 6:13-19. (in Russian).
10. Yarmakovskiy V.N. Strength and deformation characteristics of concrete at low temperatures. *Beton i zhelezobeton*. 1971; 10.
11. Istomin A.D. The work of central-stretched reinforced concrete elements at negative temperature. *Izvestiya vuzov. Tehnologiya tekstilnoy promyshlennosti*. 2017; 2:141–144.
12. Leonovich S.N. *Strength of structural concrete during cyclic freezing-thawing from the position of fracture mechanics*. Brest, BrGTU, 2006; 379.
13. Jia-Bao Yan, Jian Xie. Behaviours of reinforced concrete beams under low temperatures. *Construction and Building Materials (China)*. 2017; 141:410-425.
14. Rostasy F.S., Wiedemann G. Stress-strain-behaviour of concrete at extremely low temperature. *Cement and Concrete Research (USA)*. 1980; 10:565–572.
15. Tarakanov O.V., Belyakova Ye.A., Tarakanova Ye.O. Otsenka vliyaniya rannego zamorazhivaniya na prochnost' tsementno-peschanykh rastvorov. *Vestnik Volzhskogo regional'nogo otdeleniya Rossiyskoy akademii arkhitektury i stroitel'nykh nauk*. 2010; 13:110-117. (in Russian).
16. *Cold Weather Concrete*. TECHNICAL BULLETIN TB-01.06. W.R. Grace & Co.-Conn. 2006; 1-4.
17. Lagoyda A.V. O massopere nose i zamorazhivanii betona v rannem vozraste. *Beton i zhelezobeton — izbrannyye stat'i*. 1994; 7-10. (in Russian).
18. Ceconello I.V., Tutikian B. The influence of low temperature on the evolution of concrete strength. *Rev. IBRACON Estrut. Mater*. 2012; 5(1):3-8.
19. Husem M., Gozutok S. The effects of low temperature curing on the compressive strength of ordinary and high-performance concrete. *Construction and Building Materials*. 2005; 19(1):49-53.
20. Krasovskiy P.S. Issledovaniya svoystv betonov, tverdevshikh pri otritsatel'nykh temperaturakh. *NT otchet*. Khabarovsk, 1988; 92. (in Russian).
21. Fu Y.Y. Experimental Study on Freeze Thaw Resistance Concrete. *Advanced Materials Research*. 2013; 830:41-44.
22. Wang L.X., Shan X.T., Zhang Y.Q., Li Ch.Sh. et al. Experimental Study of Compression and Carbonation in Concrete Subjected to Freeze-Thaw Environment. *Advanced Materials Research*. 2014; 887-888:814-818.
23. Trinker A.B. Zimneye betonirovaniye i raboty v usloviyakh vechnoy merzloty. *Tekhnologii betonov*. 2013; 2(79):42-44. (in Russian).

24. Mozgalev K.M., Golovnev S.G. Osobennosti rannego zamorazhivaniya samouplotnyayushchikhsya betonov. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2012; 38(297):43-45. (in Russian).

25. Rumyantsev Ye.V., Solov'yev V.G., Bayburin A.Kh. Issledovaniye zamerzaniya na prochnost' stsepleniya v betonnykh shvakh pri zimnem betonirovanii. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2022; 22(3):61-70. (in Russian).

26. Tamrazyan A.G. Issledovaniye vliyaniya mestnoy nizkoy prochnosti betona na nesushchuyu sposobnost' iz-gibayemykh zhelezobetonnykh balok. *Zhelezobetonnyye konstruksii*. 2024; 5(1):3-14. (in Russian).

27. Kapriyelov S.S., Gol'denberg A.L., Tamrazyan A.G. O samozalechivanii vysokoprochnogo betona, podvergnutogo destruktzii pri tsiklicheskom zamorazhivanii. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*. 2017; 5(371):56-61. (in Russian).