

СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 624.012.45

DOI 10.52928/2070-1683-2025-41-2-2-12

ПРАКТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ СИЛОВОМ И ТЕМПЕРАТУРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

*д-р техн. наук, проф. Д.Н. ЛАЗОВСКИЙ¹⁾, канд. техн. наук, доц. Д.О. ГЛУХОВ²⁾,
канд. техн. наук, доц. А.М. ХАТКЕВИЧ³⁾, канд. техн. наук, доц. А.И. ГИЛЬ⁴⁾,
канд. техн. наук, доц. А.И. КОЛТУНОВ⁵⁾, канд. техн. наук Э. ЧАПАРАНГАНДА⁶⁾
(¹⁾, ³⁾-⁵⁾ Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,
²⁾ ООО «СофтКлуб», Минск, ⁶⁾ Ботсванский международный университет науки и технологий)
¹⁾ d.lazovski@psu.by, ²⁾ d.gluhov@psu.by, ³⁾ a.khatkevich@psu.by,
⁴⁾ a.hil@psu.by, ⁵⁾ a.koltunov@psu.by, ⁶⁾ katsvikisire@gmail.com*

Представлены результаты практического применения нелинейной деформационной расчетной модели для определения параметров напряженно-деформированного состояния, расчета прочности и усилия образования трещин нормального отрыва на примере центрально растянутых железобетонных элементов при силовом и температурном воздействиях. Выполнен анализ исследований влияния отрицательных температур на параметры базовых точек диаграмм деформирования бетона и арматуры железобетонных элементов. Моделирование напряженно-деформированного состояния на примере центрально растянутых железобетонных элементов выполнялось с учетом вынужденных температурных деформаций из-за разности коэффициентов температурных деформаций бетона и арматуры. Приведено распределение относительных деформаций и напряжений в поперечном сечении центрально растянутых железобетонных элементов при образовании трещин нормального отрыва при действии отрицательных температур в диапазоне с (+15°C) до (-165°C). Проведена верификация предложенной методики для расчета прочности и усилия образования трещин центрально растянутых железобетонных элементов при силовом и температурном воздействиях.

Ключевые слова: *нелинейная деформационная расчетная модель, напряженно-деформированное состояние, параметры базовых точек диаграмм деформирования бетона и арматуры при действии отрицательных температур, вынужденные температурные деформации.*

Введение. При температурно-влажностных воздействиях на железобетонные конструкции изменяются физико-механические свойства бетона и арматуры и происходят вынужденные деформации материалов вследствие усадки-набухания бетона, температурных деформаций бетона и арматуры, что отражается на их сопротивлении силовым воздействиям. Действующие в настоящее время нормативные документы в области расчета и конструирования содержат методы проверки предельных состояний железобетонных элементов, эксплуатируемых в климатических условиях стран происхождения норм (при воздействии температур не выше 100°C и не ниже минус 40°C)^{1,2,3}.

Согласно нормам проектирования, основной расчетной моделью проверки предельных состояний по прочности железобетонного элемента является нелинейная деформационная модель (НДМ) его поперечного сечения на основе использования диаграмм деформирования бетона и арматуры сжатия-растяжению для расчета сопротивления силовым воздействиям. НДМ сопротивления железобетонных элементов позволяет получать параметры их напряженно-деформированного состояния при любом сочетании силовых воздействий на любом этапе работы под нагрузкой⁴ [1–6]. Благодаря ясно выраженному физическому смыслу и широкому использованию компьютерной техники, осуществляющей итерационные процессы решения уравнений в течение короткого времени, НДМ стала активно внедряться в практику проектирования железобетонных элементов.

Диаграммы деформирования бетона и арматуры в нормальных условиях. Диаграммы деформирования бетона и арматуры, которые используются в НДМ, представляют собой аппроксимацию результатов экспериментальных исследований и относятся к случаю действия кратковременных нагрузок при нормальных климатических условиях (температура, влажность). Расчет сопротивления железобетонных элементов длительным силовым воздействиям на основе НДМ производится с использованием трансформированных диаграмм деформирования бетона,

¹ СЕВ-FIB. Model Code for Concrete Structures. – 2013. – 402 p.

² СП 63.13330.2018. СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – М.: Минстрой России, 2018. – 143 с.

³ СП 5.03.01-2020. Бетонные и железобетонные конструкции. – Минск: Минстройархитектуры, 2020. – 236 с.

⁴ Карпенко С.Н. Модели деформирования железобетона в приращениях и методы расчета конструкций: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01 / Науч.-исслед. ин-т строит. физики Рос. акад. архитектуры и строит. наук. – М., 2010. – 48 с.

учитывающих проявление бетоном свойства ползучести⁵ [1; 6; 7]. Влажностные воздействия в виде вынужденных деформаций усадки бетона учитываются в НДМ наложением на бетон расчетного поперечного сечения железобетонного элемента дополнительных относительных деформаций усадки бетона ε_{cs} [3; 6].

Для бетона принимается нелинейная диаграмма состояния бетона « $\sigma_c(\sigma_{ct}) - \varepsilon_c(\varepsilon_{ct})$ » с ниспадающей ветвью⁶ [8] (рисунок 1, а):

$$\begin{cases} \frac{\sigma_c}{f_c} = \frac{k_c \eta_c - \eta_c^2}{1 + (k_c - 2) \eta_c}; & k_c = \frac{1,1 E_{cm} |\varepsilon_{ct1}|}{f_c}; & \eta_c = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{ct1}}; & \varepsilon_{ct1} = f_c \left(0,12 + \frac{18,8}{f_c} \right) \cdot 10^{-4}; \\ \sigma_{ct} = f_{ctm} \left[2 \left(\frac{\varepsilon_{ct}}{\varepsilon_{ct1}} \right) - \left(\frac{\varepsilon_{ct}}{\varepsilon_{ct1}} \right)^2 \right]; \\ \sigma_{ct} = \frac{f_{ctm} \varepsilon_{ct1}}{\varepsilon_{ct}} = \frac{2 f_{ctm} \varepsilon_{ctu}}{K \varepsilon_{ct}} = \frac{2 f_{c,cube} \varepsilon_{ctu}}{K^2 \varepsilon_{ct}}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\sigma_c(\sigma_{ct})$ – напряжения при сжатии (растяжении);
 $\varepsilon_c(\varepsilon_{ct})$ – относительные деформации при сжатии (растяжении);
 $\varepsilon_{ct1} = 0,7 f_c^{0,31}$ – относительные деформации бетона в вершине диаграммы деформирования;
 $f_{ct} = 0,232 f_c^{2/3}$ – прочность бетона при растяжении;
 f_c – призмная прочность при сжатии;
 E_c – начальный модуль упругости;
 E_{ct} – начальный модуль упругости бетона при растяжении;
 ε_{ct1} – относительные деформации в вершине диаграммы деформирования;
 ε_{ctu} – предельное значение относительных деформаций бетона при растяжении.
 Значения E_{ct} , ε_{ct1} и ε_{ctu} определяются по следующим формулам:

$$E_{ct} = \frac{10^7 \cdot f_{ct}}{750 + 81,55 \cdot f_{ct}}; \quad \varepsilon_{ctu} = \frac{K \cdot \varepsilon_{ct1}}{2}; \quad K = 6,4 + 0,1223 f_c. \quad (2)$$

Для арматуры железобетонных элементов в общем случае принимается билинейная диаграмма деформирования, имеющая базовые точки: 1 – предел текучести f_y и соответствующие относительные деформации ε_y с модулем упругости E_s ; 2 – временное сопротивление арматуры $f_u = k f_y$ (коэффициент k определяется классом деформативности (пластичности) арматуры⁷) и относительные деформации арматуры при разрыве ε_u (рисунок 1, б).

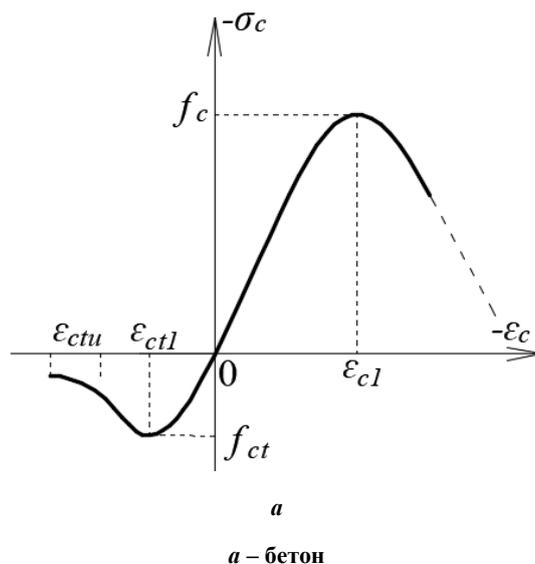


Рисунок 1. – Диаграммы деформирования при кратковременном нагружении и нормальных температурно-влажностных условиях (начало)

⁵ См. сноску 4.

⁶ См. сноски 1, 2 и 3.

⁷ См. сноску 3.

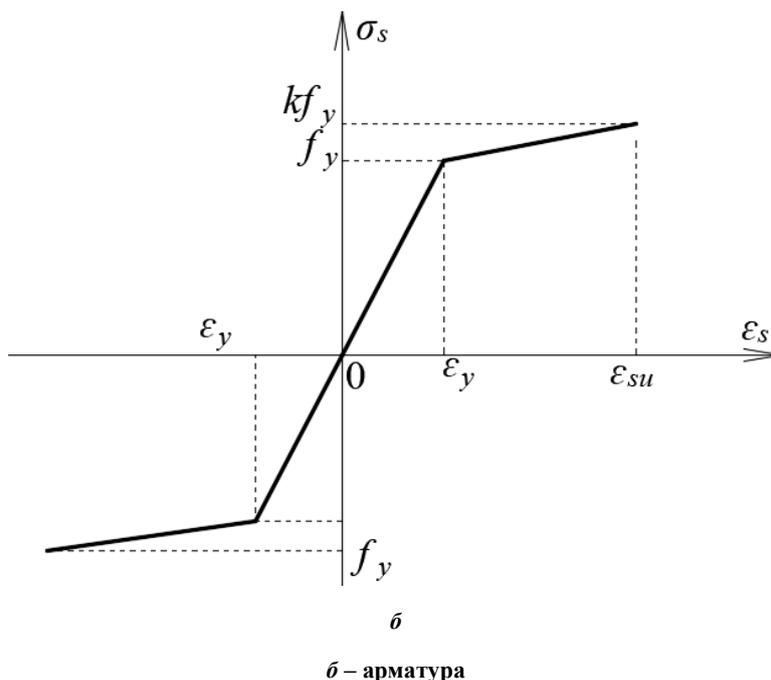


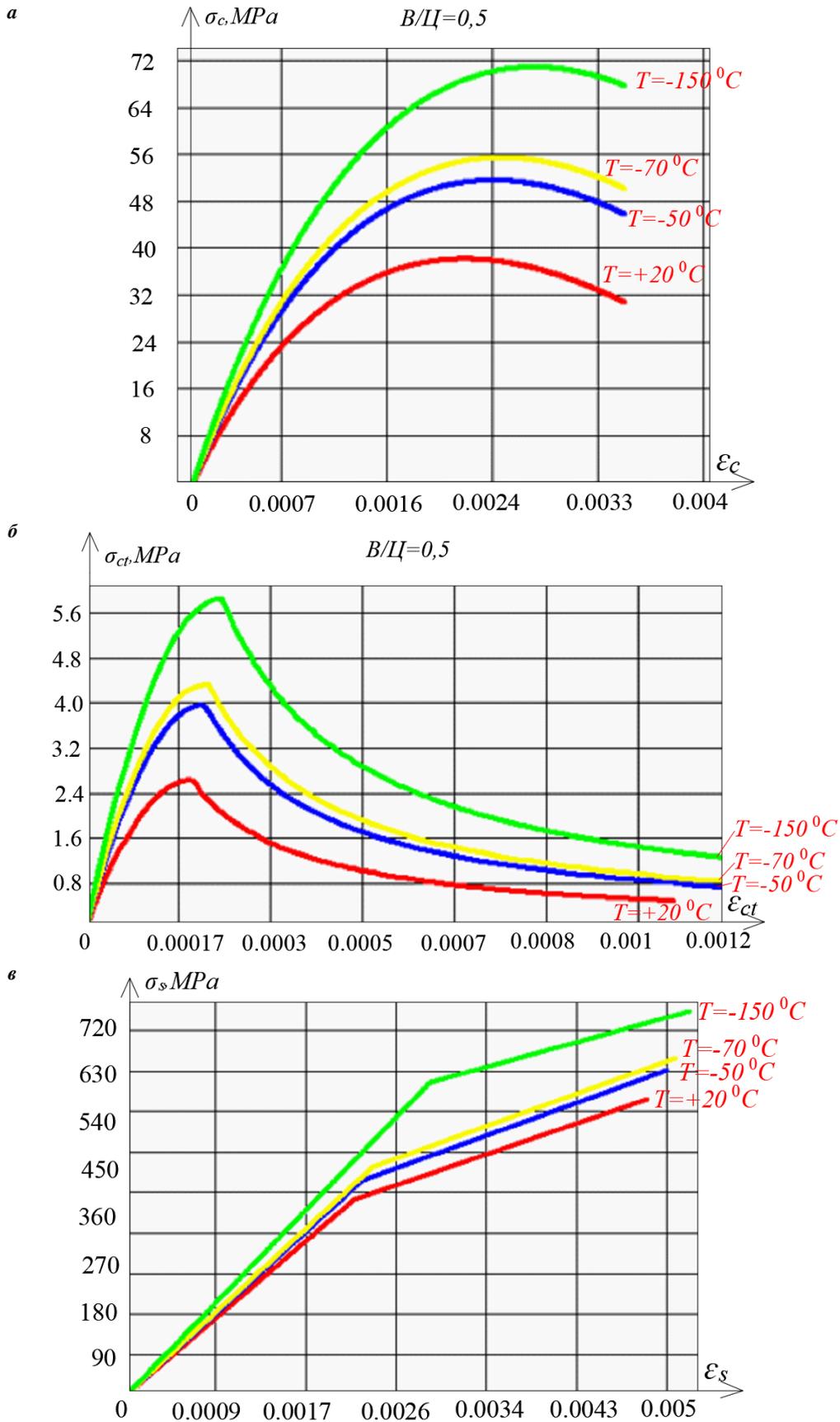
Рисунок 1. – Диаграммы деформирования при кратковременном нагружении и нормальных температурно-влажностных условиях (окончание)

Применение НДМ к расчету железобетонных элементов при совместном силовом и температурно-влажностном воздействиях требует трансформации параметров (основных базовых точек) принятых аппроксимаций диаграмм деформирования бетона и арматуры, а также учета дополнительных вынужденных температурно-влажностных деформаций, не проявляющихся в работе железобетона в обычных условиях. При этом соблюдается условие совместности деформаций арматуры и бетона (справедлива гипотеза плоских сечений для распределения средних относительных деформаций по поперечному сечению железобетонного элемента) [9–12].

Учет воздействия отрицательных температур. Параметры диаграмм деформирования бетона и арматуры для расчета по НДМ с учетом температурных воздействий зависят от величины температуры [9–20]. При воздействии как отрицательных, так и положительных температур изменяются начальный модуль упругости бетона $E_{c,T} = \beta_{Ec} \cdot E_c$, его призменная прочность $f_{c,T} = \beta_{fc} \cdot f_c$ и соответствующие ей относительные деформации $\varepsilon_{c1,T} = \beta_{\varepsilon} \cdot \varepsilon_{c1}$, сопротивление растяжению $f_{ct,T} = \beta_{fct} \cdot f_{ct}$, где E_c , f_c и ε_{c1} , f_{ct} – соответственно начальный модуль упругости, сопротивление и относительные деформации в вершине параболической диаграммы деформирования при сжатии, сопротивление при растяжении бетона, изготовленного на природных заполнителях оптимизированного состава, естественной влажности, в возрасте 28 суток, при $t = +20^\circ\text{C}$. Изменяются также модуль упругости, предел текучести и временное сопротивление арматуры: $E_{s,T} = \beta_E \cdot E_s$, $f_{y,T} = \beta_{fy} \cdot f_y$ и $f_{u,T} = \beta_{fu} \cdot f_u$. Принимается, что параметры базовых точек арматуры при растяжении и сжатии одинаковы. Коэффициент температурных деформаций для бетона $\alpha_{c,T}$ и арматуры $\alpha_{s,T}$ также зависит от величины температуры $T^\circ\text{C}$. Аппроксимации диаграмм деформирования бетона и арматуры с учетом влияния температурных воздействий на параметры базовых точек приведены на рисунке 2.

Согласно исследованиям [11–13], на напряженно-деформационные параметры базовых точек бетона, кроме температуры, оказывают влияние структурно-технологические характеристики бетона, такие как водоцементное отношение (В/Ц) и влажность ($W\%$) бетона на начало действия отрицательных температур. Известно, что с увеличением В/Ц в цементном камне увеличивается объем пор, которые могут заполняться водой с возрастанием влажности бетона. При отрицательных температурах свободная вода в порах и связанная в соединениях, составляющих цементный камень, замерзает, а бетон превращается в сплошное твердое тело с повышенными упругими характеристиками. Если водонасыщение пор превышает 90% объема, что соответствует влажности бетона 5,1%, то при замерзании в условиях ограниченного объема пор и относительного увеличения объема льда (в сравнении с объемом воды) начинается процесс разрушения стенок пор цементного камня. Влажность бетона $\leq 3,1\%$ соответствует воздушно-сырому состоянию.

Значения коэффициентов β_{Ec} , β_{fc} , β_{ε} , β_{Es} , β_{fct} , β_{Es} , β_{fy} и β_{fu} применительно к аппроксимациям диаграмм деформирования бетона и арматуры, а также коэффициентов температурных деформаций бетона $\alpha_{c,T}$ и арматуры $\alpha_{s,T}$ по результатам анализа исследований [17–20] приведены в таблице 1. Значения поправочных коэффициентов для бетона не экстраполируются за пределы указанных в таблице интервалов температуры и влажности бетона более 5,1%.



а – бетон при осевом сжатии; б – бетон при осевом растяжении; в – арматура

Рисунок 2. – Диаграммы деформирования бетона и арматуры в диапазоне температур от +20 до -150°C

Таблица 1. – Поправочные коэффициенты учета влияния температурно-влажностных воздействий на параметры базовых точек диаграмм деформирования бетона и арматуры железобетонных элементов

| Диапазон температуры и влажности | Бетон | Арматура |
|---|--|---|
| $-70^{\circ}\text{C} \leq T^{\circ}\text{C} < +20^{\circ}\text{C}$ $W\% \leq 3,1\%$ | $\beta_{Ec} = 1 + 0,2 \frac{20^{\circ}\text{C} - T^{\circ}\text{C}}{90^{\circ}\text{C}}$ $\beta_{\varepsilon} = 1 + 0,55 \frac{20^{\circ}\text{C} - T^{\circ}\text{C}}{90^{\circ}\text{C}}$ $\beta_{fc} = 1 + 0,6 \frac{20^{\circ}\text{C} - T^{\circ}\text{C}}{90^{\circ}\text{C}}$ $\beta_{fct} \approx 1 + 1,3 \frac{20^{\circ}\text{C} - T^{\circ}\text{C}}{90^{\circ}\text{C}}$ | |
| $-150^{\circ}\text{C} \leq T^{\circ}\text{C} < -70^{\circ}\text{C}$ $W\% \leq 3,1\%$ | $\beta_E = 1 - \frac{55,5^{\circ}\text{C} + 1,05T^{\circ}\text{C}}{90^{\circ}\text{C}}$ $\beta_{fc} = 1 + 0,6 \left(\frac{20^{\circ}\text{C} - T^{\circ}\text{C}}{90^{\circ}\text{C}} \right) + \sqrt{\frac{-70^{\circ}\text{C} - T^{\circ}\text{C}}{90^{\circ}\text{C}}}$ $\beta_{\varepsilon} = 1 + \frac{99,5^{\circ}\text{C} + 0,65T^{\circ}\text{C}}{90^{\circ}\text{C}}$ | |
| С учетом влажности бетона $W\%$ на начало действия отрицательных температур при водоцементном отношении: | | |
| $-70^{\circ}\text{C} \leq T^{\circ}\text{C} \leq -30^{\circ}\text{C}$ $3,1\% \leq W\% \leq 5,1\%$ | $В/Ц = 0,4$ | |
| | $\beta_E = 1 + \left[0,03 + 0,12 \left(\frac{W\% - 3\%}{1\%} \right) \right] \left(\frac{20^{\circ}\text{C} - T^{\circ}\text{C}}{90^{\circ}\text{C}} \right)$ | $\beta_{fy} = 2 \cdot 10^{-5} (T^{\circ}\text{C})^2 - 0,0017T^{\circ}\text{C} + 1$ |
| | $\beta_{fc} = 1 + \left[0,13 + 0,45 \left(\frac{W\% - 3\%}{1\%} \right) \right] \left(\frac{20^{\circ}\text{C} - T^{\circ}\text{C}}{90^{\circ}\text{C}} \right)$ | $\beta_{fct} = 3,11 \cdot 10^{-6} (T^{\circ}\text{C})^2 - 0,00198T^{\circ}\text{C} + 1$ |
| | $\beta_{\varepsilon} = 1 + \left[0,05 + 0,085 \left(\frac{W\% - 3\%}{1\%} \right) \right] \left(\frac{20^{\circ}\text{C} - T^{\circ}\text{C}}{90^{\circ}\text{C}} \right)$ | |
| | $\beta_{fct} = 1 + \left[0,15 + 0,5 \left(\frac{W\% - 3\%}{1\%} \right) \right] \left(\frac{20^{\circ}\text{C} - T^{\circ}\text{C}}{90^{\circ}\text{C}} \right)$ | |
| | $В/Ц = 0,5$ | |
| | $\beta_E = 1 + \left[0,015 + 0,12 \left(\frac{W\% - 3\%}{1\%} \right) \right] \left(\frac{20^{\circ}\text{C} - T^{\circ}\text{C}}{90^{\circ}\text{C}} \right)$ | |
| | $\beta_{fc} = 1 + \left[0,06 + 0,45 \left(\frac{W\% - 3\%}{1\%} \right) \right] \left(\frac{20^{\circ}\text{C} - T^{\circ}\text{C}}{90^{\circ}\text{C}} \right)$ | |
| $\beta_{\varepsilon} = 1 + \left[0,06 + 0,075 \left(\frac{W\% - 3\%}{1\%} \right) \right] \left(\frac{20^{\circ}\text{C} - T^{\circ}\text{C}}{90^{\circ}\text{C}} \right)$ | | |
| $\beta_{fct} = 1 + \left[0,15 + 0,5 \left(\frac{W\% - 3\%}{1\%} \right) \right] \left(\frac{20^{\circ}\text{C} - T^{\circ}\text{C}}{90^{\circ}\text{C}} \right)$ | | |
| $0^{\circ}\text{C} \leq T^{\circ}\text{C} \leq +20^{\circ}\text{C}$ | $\alpha_{c,T} \approx 0,9 \cdot 10^{-5} \text{град}^{-1}$ | $\alpha_{s,T} \approx 1,0 \cdot 10^{-5} \text{град}^{-1}$ |
| $-40^{\circ}\text{C} \leq T^{\circ}\text{C} < 0^{\circ}\text{C}$ | $\alpha_{c,T} \approx 1,13 \cdot 10^{-5} \text{град}^{-1}$ | |
| $-150^{\circ}\text{C} \leq T^{\circ}\text{C} < -40^{\circ}\text{C}$ | $\alpha_{c,T} \approx 0,9 \cdot 10^{-5} \text{град}^{-1}$ | |

Верификация НДМ при действии отрицательных температур. Практическое моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) железобетонных элементов при силовом и температурном воздействиях проведем на примере испытаний [20] центрально растянутых призм с размерами поперечного сечения 120×180 мм длиной 800 мм, армированных четырьмя стержнями арматуры $\varnothing 10$ мм ($c = c_1 = 25$ мм) класса А400 ($E_s = 2 \cdot 10^5$ МПа; $f_y = 433$ МПа; $f_u = 656$ МПа). Влажность бетона на начало действия отрицательных температур составляла $W = 5,25\%$, что свидетельствует о более высоком В/Ц – принимаем В/Ц = 0,5. Испытания проводились с варьированием температуры опытных образцов: $+15^{\circ}\text{C}$; -50°C ; -70°C ; -165°C . При этих же температурах проведены испытания бетонных призм и арматурных стержней на растяжение, находящихся в аналогичном температурно-влажностном режиме. При испытании бетонных образцов на растяжение получали модуль упругости при растяжении $E_{ct,T}$ и сопротивление растяжению $f_{ct,T}$. Результаты испытаний бетона и арматуры железобетонных призм [20], а также аналогичные параметры, вычисленные по формулам (1), (2) и таблицы 1, приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Параметры бетона и арматуры по результатам испытаний [20] и вычислений по формулам (1), (2) и таблицы 1

| Параметр | | Температура при испытании | | | |
|----------|---------------------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| | | +15°C | -50°C | -70°C | -165°C |
| Бетон | $E_{ct,T}^{exp} \cdot 10^{-3}$, МПа | 22,3 | 30,1 | 32,3 | 35,46 |
| | $E_{ct,T}^{calc} \cdot 10^{-3}$, МПа | – | $1,21 \cdot 22,3 = 27$ | $1,27 \cdot 22,3 = 28,3$ | $1,5 \cdot 22,3 = 33,5$ |
| | $f_{ct,T}^{exp}$, МПа | 1,3 | 2,64 | 2,99 | 3,18 |
| | $f_{ct,T}^{calc}$, МПа | – | $1,87 \cdot 1,3 = 2,39$ | $2,08 \cdot 1,3 = 2,7$ | $3 \cdot 1,3 = 3,9$ |
| Арматура | $E_{s,T}^{exp} \cdot 10^{-5}$, МПа | 2,0 | 2,1 | 2,16 | 2,22 |
| | $E_{s,T}^{calc} \cdot 10^{-5}$, МПа | – | $1,056 \cdot 2,0 = 2,1$ | $1,08 \cdot 2,0 = 2,16$ | $1,22 \cdot 2,0 = 2,44$ |
| | $f_{y,T}^{exp}$, МПа | 433 | 475 | 510 | 780 |
| | $f_{y,T}^{calc}$, МПа | – | $1,1 \cdot 433 = 476$ | $1,17 \cdot 433 = 507$ | $1,71 \cdot 433 = 740$ |
| | $f_{u,T}^{exp}$, МПа | 656 | 704 | 728 | 826 |
| | $f_{u,T}^{calc}$, МПа | – | $1,11 \cdot 656 = 728$ | $1,15 \cdot 656 = 754$ | $1,41 \cdot 656 = 925$ |

Результаты моделирования параметров НДС с использованием НДМ центрально растянутых железобетонных элементов перед образованием трещин нормального отрыва при варьируемых в эксперименте [20] температурах приведены на рисунке 2. Моделирование НДС опытных образцов выполнялось с учетом вынужденных температурных деформаций аналогично учету усадки бетона [7]:

$$\epsilon_T = (\alpha_{c,T} - \alpha_{s,T}) \cdot \Delta T, \tag{3}$$

где ΔT – разность температуры образца при испытании и изготовлении железобетонного элемента.

Следует отметить весьма незначительные температурные деформации и напряжения из-за малости разности коэффициентов температурного расширения бетона и арматуры при действии отрицательных температур. Например, для условий принятого к анализу эксперимента даже при $T = -165^\circ\text{C}$: $\epsilon_T = (0,9 - 1,0) \cdot [-165^\circ\text{C} - (+15^\circ\text{C})] \cdot 10^{-5} = 18 \cdot 10^{-5}$, что оказывает незначительное влияние на параметры НДС в поперечном сечении железобетонного элемента (рисунок 3).

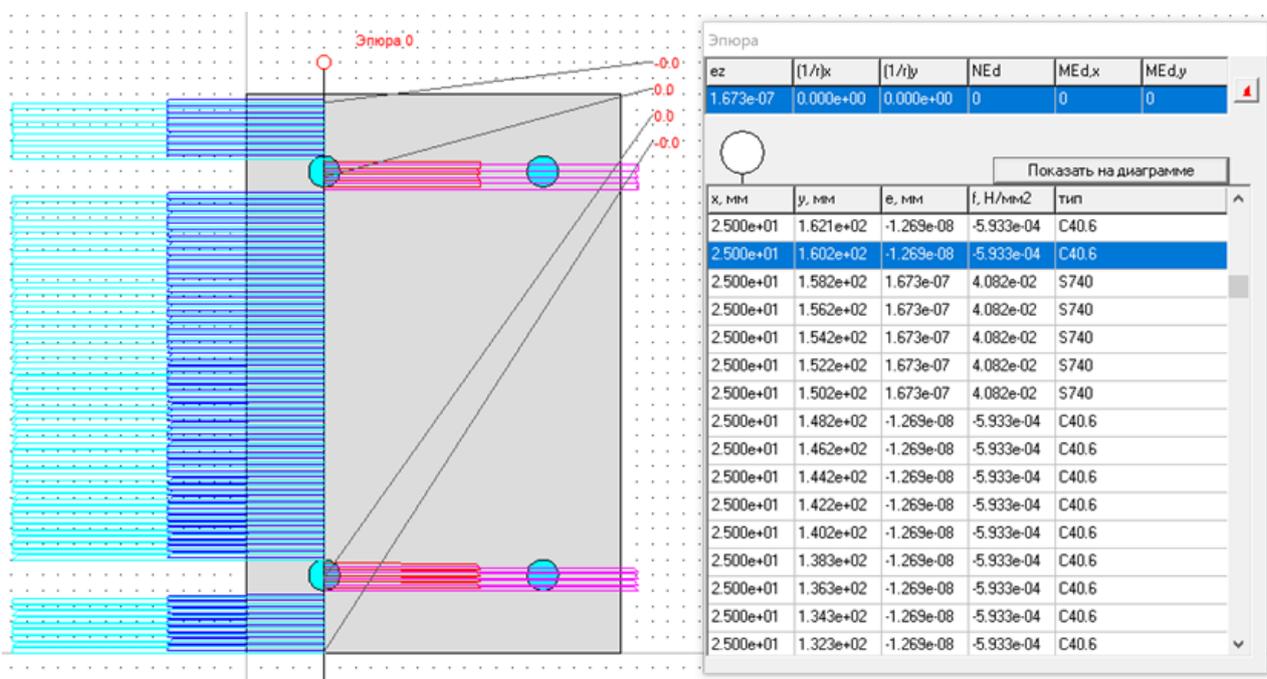


Рисунок 3. – Параметры НДС в поперечном сечении опытного образца при температуре испытания $T = -165^\circ\text{C}$ (бетон сжат, арматура растянута)

Результаты вычислений усилия образования трещин нормального отрыва N_{cr}^{calc} по расчетным параметрам базовых точек диаграмм деформирования НДМ для центрально растянутых железобетонных элементов [20] приведены на рисунке 4.

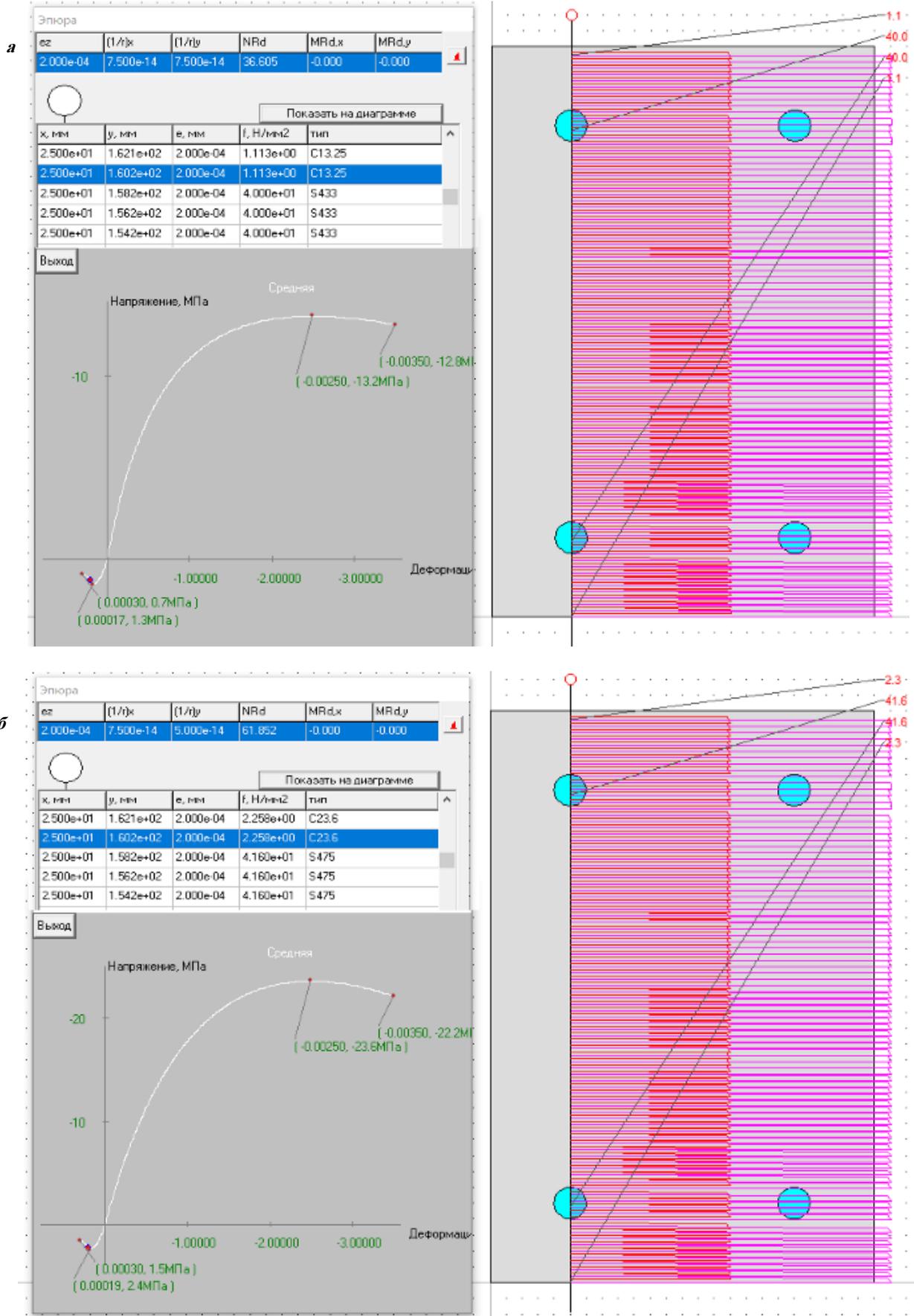


Рисунок 4. – Усилия образования трещин нормального отрыва в поперечном сечении опытных образцов при температуре испытания $T = +15^{\circ}\text{C}$ (а); $T = -50^{\circ}\text{C}$ (б) (начало)

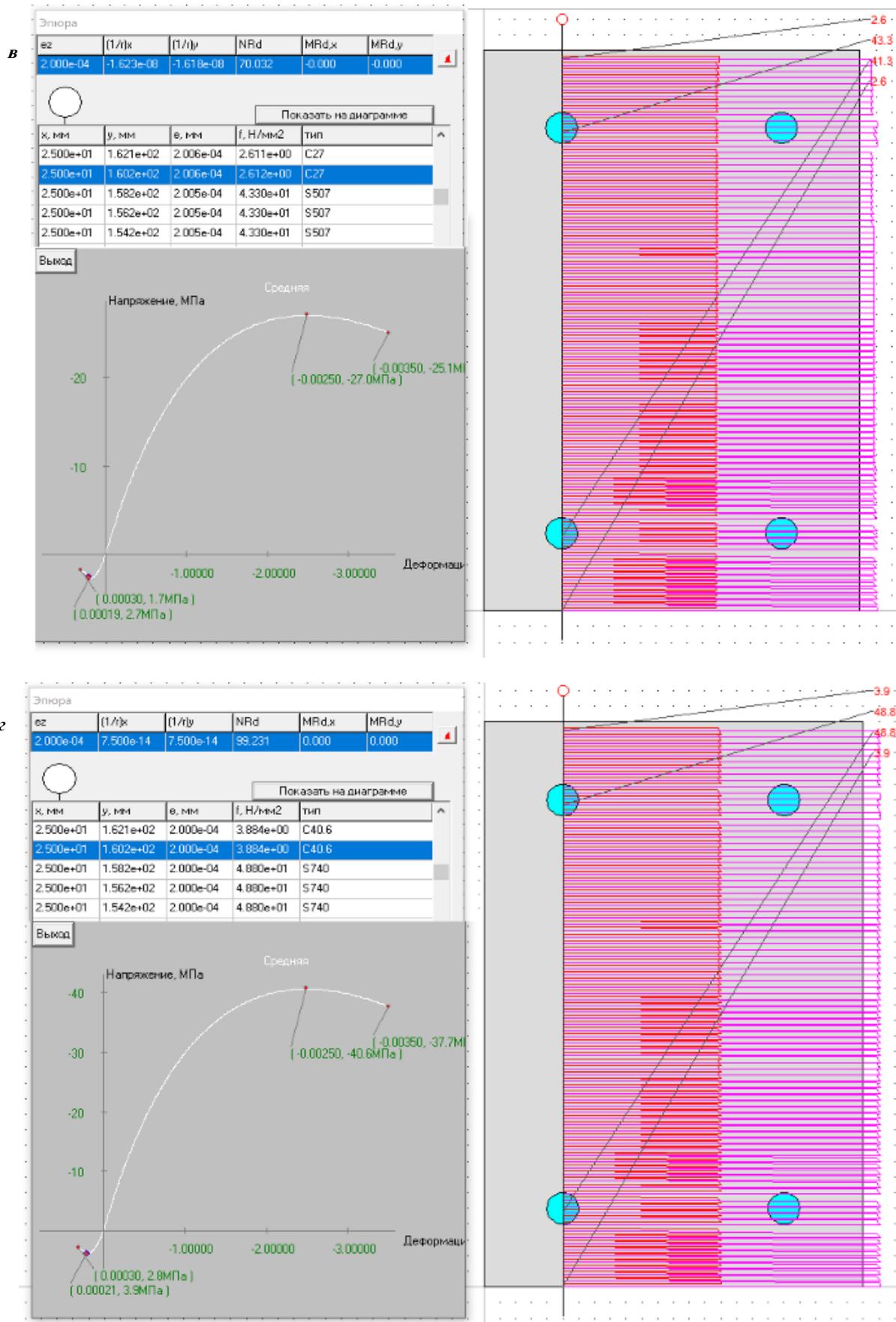


Рисунок 4. – Усилия образования трещин нормального отрыва в поперечном сечении опытных образцов при температуре испытания $T = -70^{\circ}\text{C}$ (в); $T = -165^{\circ}\text{C}$ (з) (окончание)

Помимо вычисления усилия образования трещин нормального отрыва N_{cr}^{calc} по расчетным параметрам диаграмм деформирования проводили расчет усилия $N_{cr,exp}^{calc}$ по экспериментальным параметрам базовых точек. Кроме того, аналогично вычисляли предельные усилия при растяжении N_u^{calc} и $N_{u,exp}^{calc}$ для экспериментальных образцов. Результаты вычислений приведены в таблице 3.

Таблица 3. – Результаты сопоставления расчетных и экспериментальных данных для опытных образцов [20]

| Силовой параметр | Температура при испытании | | | |
|----------------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|
| | +15°C | -50°C | -70°C | -165°C |
| N_{cr}^{exp} , кН | 36,0 | 69,5 | 79,5 | 94,2 |
| N_{cr}^{calc} , кН | 36,605 | 61,852 | 70,032 | 99,231 |
| $N_{cr}^{exp}/N_{cr}^{calc}$ | 0,98 | 1,12 | 1,14 | 0,95 |
| $N_{cr,exp}^{calc}$, кН | 36,605 | 68,117 | 78,027 | 82,635 |
| $N_{cr}^{exp}/N_{cr,exp}^{calc}$ | 0,98 | 1,02 | 1,02 | 1,14 |
| N_u^{exp} , кН | 137,91 | 152,88 | 168,25 | 255,32 |
| N_u^{calc} , кН | 135,96 | 149,46 | 159,2 | 232,36 |
| N_u^{exp}/N_u^{calc} | 1,01 | 1,02 | 1,06 | 1,1 |
| $N_{u,exp}^{calc}$, кН | 135,96 | 149,15 | 160,14 | 244,92 |
| $N_u^{exp}/N_{u,exp}^{calc}$ | 1,01 | 1,03 | 1,05 | 1,04 |

Проведенное сопоставление расчетных по НДМ и экспериментальных данных влияния отрицательных температур на предельное усилие и усилие образования трещин нормального отрыва центрально растянутых железобетонных элементов показывает их удовлетворительную сходимость, что свидетельствует об аналитическом описании параметров базовых точек диаграмм бетона и арматуры (см. формулы таблицы 1), близком к действительному. В случае использования в расчетах по НДМ экспериментальных данных параметров базовых точек диаграмм деформирования бетона и арматуры сходимость результатов расчета по НДМ с опытными данными еще более удовлетворительная. Учет вынужденных температурных деформаций (аналогично усадке бетона) в расчете железобетонных элементов практически не оказывает влияния на параметры их НДС из-за малости разницы между коэффициентами температурных деформаций бетона и арматуры.

Заключение. Проведенный анализ исследований показал, что низкая отрицательная температура оказывает существенное влияние на параметры базовых точек диаграмм деформирования бетона и арматуры железобетонных конструкций.

Вынужденные температурные деформации из-за разности коэффициентов температурных деформаций бетона и арматуры при действии отрицательной температуры вызывают дополнительные деформации сжатия бетона и деформации растяжения арматуры.

На примере центрально растянутых железобетонных элементов проведена верификация нелинейной деформационной расчетной модели для вычисления прочности и усилия образования трещин центрально растянутых железобетонных элементов при силовом и температурном воздействиях в диапазоне с (+15°C) до (-165°C).

ЛИТЕРАТУРА

1. Карпенко Н.И., Мухамедиев Т.А., Петров А.Н. Исходные и трансформированные диаграммы деформирования бетона и арматуры // Напряженно-деформированное состояние бетонных и железобетонных конструкций. – М.: НИИЖБ, 1986. – С. 7–25.
2. Карпенко Н.И., Соколов Б.С., Радаikin О.В. К оценке прочности, жесткости, момента образования трещин и их раскрытия в зоне чистого изгиба железобетонных балок с применением нелинейной деформационной модели // Изв. высш. учеб. заведений. Стр-во. – 2016. – № 3(687). – С. 5–12.
3. Лазовский Д.Н. Усиление железобетонных конструкций эксплуатируемых строительных сооружений. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 1998. – С. 224–230.
4. Расчетная модель напряженно-деформированного состояния статически неопределимых железобетонных конструкций / Д.Н. Лазовский, Д.О. Глухов, Е.Д. Лазовский и др. // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. F, Стр-во. Приклад. науки. – 2022. – № 14. – С. 29–44. DOI: 10.52928/2070-1683-2022-32-14-29-44.
5. Work modelling of bending reinforced concrete elements under load / E. Chaparanganda, D. Lazouski, Y. Lazouski et al. // Journal of New Results in Science. – 2021. – № 10(1). – P. 100–114.
6. Учет ползучести и усадки бетона по СП 5.03.01-2020 при расчете железобетонных конструкций на основе деформационной расчетной модели / Д.Н. Лазовский, В.В. Тур, Д.О. Глухов и др. // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2021. – № 2(125). – С. 7–12. DOI: 10.36773/1818-1212-2021-125-2-7-12.
7. Статически неопределимые железобетонные конструкции. Диаграммные методы автоматизированного расчета и проектирования: метод. пособие / Н.И. Карпенко, В.И. Травуш, С.Н. Карпенко и др. – М.: М-во стр-ва и жилищ.-комму. хоз-ва Рос. Федерации, 2017. – 197 с.
8. Тур В.В., Рак Н.А. Прочность и деформации бетона в расчетах конструкций. – Брест: БГТУ, 2003. – 252 с.

9. Карпенко С.Н., Карпенко Н.И., Ярмаковский В.Н. О построении диаграммного метода расчета стержневых железобетонных конструкций при отрицательных температурах // Полярная механика: сб. докл. на III междунар. конф. / г. Владивосток (27–30 сент. 2016 г.). – Владивосток: СФУ, 2016. – С. 181–191.
10. О построении диаграммного метода расчета стержневых железобетонных конструкций в условиях действия низких отрицательных температур / Н.И. Карпенко, В.Н. Ярмаковский, С.Н. Карпенко и др. // Изв. вузов. Стр.-во. – 2018. – № 6(714). – С. 5–17.
11. К диаграммам деформирования бетона под нагрузкой при действии температуры до минус 70°C в зависимости от его структурно-технологических характеристик / Н.И. Карпенко, В.Н. Ярмаковский, С.Н. Карпенко и др. // Строит. материалы. – 2018. – № 6. – С. 13–19.
12. Карпенко С.Н., Карпенко Н.И., Ярмаковский В.Н. Диаграммный метод расчета стержневых железобетонных конструкций, эксплуатируемых при воздействии низких отрицательных температур // Academia. Архитектура и стр.-во. – 2017. – № 1. – С. 104–108.
13. Бетон для строительства в суровых климатических условиях / В.М. Москвин, М.М. Капкин, А.Н. Савицкий и др. – Л.: Ленинград. отд.-ние Стройиздата. – 1973. – 168 с.
14. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях. В 2 ч. / С.Н. Леонович, Д.А. Литвиновский, О.Ю. Черныкевич и др.; под ред. С.Н. Леоновича. – Минск: БНТУ, 2016. – Ч. 1. – 393 с.
15. Истомин А.Д. Работа центрально-растянутых железобетонных элементов при отрицательной температуре // Изв. вузов. Технология текстильной пром.-сти. – 2017. – № 2. – С. 141–144.
16. Зайцев Ю.В., Леонович С.Н. Прочность и долговечность конструкционных материалов с трещиной. – Минск: БНТУ, 2010. – 361 с.
17. Мулин Н.М., Мешков В.З. Области применения арматурной стали в конструкциях, эксплуатируемых при низких температурах // Бетон и железобетон. – 1977. – № 1. – С. 18–20.
18. Мулин Н.М., Мешков В.З. О механических свойствах горячекатаных арматурных сталей при низких температурах // Проблемы прочности. – 1970. – № 8. – С. 18–21.
19. Михайлов К.В., Милованов А.Ф., Самойленко В.Н. Учет влияния низкой температуры при расчете железобетонных изо-термических резервуаров // Криогенный бетон: по материалам междунар. конф. – М.: Стройиздат, 1986. – С. 58–63.
20. Истомин А.Д., Петрова В.А. Влияние отрицательных температур на прочность и деформативность железобетонного элемента // Железобетон. конструкции. – 2023. – Т. 4, № 4. – С. 3–12.

REFERENCES

1. Karpenko N.I., Mukhamediev T.A., Petrov A.N. Iskhodnye i transformirovannye diagrammy deformirovaniya betona i armatury // *Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie betonnykh i zhelezobetonnykh konstruksii*. – M.: NIIZhB, 1986. – S. 7–25.
2. Karpenko N.I., Sokolov B.S., Radaikin O.V. K otsenke prochnosti, zhestkosti, momenta obrazovaniya treshchin i ikh raskrytiya v zone chistogo izgiba zhelezobetonnykh balok s primeneniem nelineinoy deformatsionnoy modeli // *Izv. vyssh. ucheb. zavedenii. Str.-vo*. – 2016. – № 3(687). – S. 5–12.
3. Lazovskii D.N. Usilenie zhelezobetonnykh konstruksii ekspluatiruemykh stroitel'nykh sooruzhenii. – Novopolotsk: Polots. gos. un-t, 1998. – S. 224–230.
4. Raschetnaya model' napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya staticheski neopredelimykh zhelezobetonnykh konstruksii / D.N. Lazovskii, D.O. Glukhov, E.D. Lazovskii i dr. // *Vestn. Polots. gos. un-ta. Ser. F, Str.-vo. Priklad. nauki*. – 2022. – № 14. – S. 29–44. DOI: 10.52928/2070-1683-2022-32-14-29-44.
5. Work modelling of bending reinforced concrete elements under load / E. Chaparanga, D. Lazouski, Y. Lazouski et al. // *Journal of New Results in Science*. – 2021. – № 10(1). – P. 100–114.
6. Uchet polzuchesti i usadki betona po SP 5.03.01-2020 pri raschete zhelezobetonnykh konstruksii na osnove deformatsionnoy raschetnoy modeli / D.N. Lazovskii, V.V. Tur, D.O. Glukhov i dr. // *Vestn. Brest. gos. tekhn. un-ta*. – 2021. – № 2(125). – S. 7–12. DOI: 10.36773/1818-1212-2021-125-2-7-12.
7. *Staticheski neopredelime zhelezobetonnye konstruksii. Diagrammnye metody avtomatizirovannogo rascheta i proekti-rovaniya: metod. posobie* / N.I. Karpenko, V.I. Travush, S.N. Karpenko i dr. – M.: M-vo str.-va i zhilishch.-kommun. khoz.-va Ros. Federatsii, 2017. – 197 s.
8. Tur V.V., Rak N.A. *Prochnost' i deformatsii betona v raschetakh konstruksii*. – Brest: BGTU, 2003. – 252 s.
9. Karpenko S.N., Karpenko N.I., Yarmakovskii V.N. O postroenii diagrammnogo metoda rascheta sterzhnevyykh zhelezobetonnykh konstruksii pri otritsatel'nykh temperaturakh // *Polyarnaya mekhanika: sb. dokl. na III mezhdunar. konf. / g. Vladivostok (27–30 sent. 2016 g.)*. – Vladivostok: SFU, 2016. – S. 181–191.
10. O postroenii diagrammnogo metoda rascheta sterzhnevyykh zhelezobetonnykh konstruksii v usloviyakh deistviya nizkikh otritsatel'nykh temperatur / N.I. Karpenko, V.N. Yarmakovskii, S.N. Karpenko i dr. // *Izv. vuzov. Str.-vo*. – 2018. – № 6(714). – S. 5–17.
11. K diagrammam deformirovaniya betona pod nagruzkoi pri deistvii temperatury do minus 70°C v zavisimosti ot ego strukturno-tekhnologicheskikh kharakteristik / N.I. Karpenko, V.N. Yarmakovskii, S.N. Karpenko i dr. // *Stroit. materialy*. – 2018. – № 6. – S. 13–19.
12. Karpenko S.N., Karpenko N.I., Yarmakovskii V.N. Diagrammnyi metod rascheta sterzhnevyykh zhelezobetonnykh konstruksii, ekspluatiruemykh pri vozdeistvii nizkikh otritsatel'nykh temperatur // *Academia. Arkhitektura i str.-vo*. – 2017. – № 1. – S. 104–108.
13. *Beton dlya stroitel'stva v surovyykh klimaticheskikh usloviyakh* / V.M. Moskvina, M.M. Kapkin, A.N. Savitskii i dr. – L.: Leningrad. otd.-nie Stroiizdata. – 1973. – 168 s.
14. *Prochnost', treshchinostoikost' i dolgovechnost' konstruksionnogo betona pri temperaturnykh i korrozionnykh vozdeistviyakh*. V 2 ch. / S.N. Leonovich, D.A. Litvinovskii, O.Yu. Chernyakevich i dr.; pod red. S.N. Leonovicha. – Minsk: BNTU, 2016. – Ch. 1. – 393 s.

15. Istomin A.D. Rabota tsentral'no-rastyanutykh zhelezobetonnykh elementov pri otritsatel'noi temperature // *Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noi prom-sti.* – 2017. – № 2. – S. 141–144.
16. Zaitsev Yu.V., Leonovich S.N. *Prochnost' i dolgovechnost' konstruktsionnykh materialov s treshchinoi.* – Minsk: BNTU, 2010. – 361 s.
17. Mulin N.M., Meshkov V.Z. Oblasti primeneniya armaturnoi stali v konstruktsiyakh, ekspluatiruemyykh pri nizkikh temperaturakh // *Beton i zhelezobeton.* – 1977. – № 1. – S. 18–20.
18. Mulin N.M., Meshkov V.Z. *O mekhanicheskikh svoystvakh goryachekatanykh armaturnykh staley pri nizkikh temperaturakh* // *Problemy prochnosti.* – 1970. – № 8. – S. 18–21.
19. Mikhailov K.V., Milovanov A.F., Samoilenko V.N. Uchet vliyaniya nizkoi temperatury pri raschete zhelezobetonnykh izotermicheskikh rezervuarov // *Kriogennyi beton: po materialam mezhdunar. konf.* – M.: Stroiizdat, 1986. – S. 58–63.
20. Istomin A.D., Petrova V.A. Vliyanie otritsatel'nykh temperatur na prochnost' i deformativnost' zhelezobetonnoogo elementa // *Zhelezobeton. konstruktsii.* – 2023. – T. 4, № 4. – S. 3–12.

Поступила 10.06.2025

PRACTICAL MODELING OF THE STRESS-STRAIN STATE OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS UNDER FORCE AND TEMPERATURE INFLUENCES

D. LAZOUSKI¹⁾, D. GLUKHOV²⁾, A. KHATKEVICH³⁾, A. HIL⁴⁾, A. KALTUNOU⁵⁾, E. CHAPARANGANDA⁶⁾
(<sup>1), 3)-5) *Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*, ^{2) LLC «SoftClub», Minsk,}
^{6) *Botswana International University of Science and Technology*)}</sup>

The results of the practical application of a nonlinear deformation calculation model for determining the parameters of the stress-strain state, calculating the strength and crack formation force of normal separation using the example of centrally stretched reinforced concrete elements under force and temperature influences are presented. The analysis of studies of the influence of negative temperatures on the parameters of the base points of the diagrams of deformation of concrete and reinforcement of reinforced concrete elements is carried out. Modeling of the stress-strain state using the example of centrally stretched reinforced concrete elements was performed taking into account forced temperature deformations due to the difference in the coefficients of temperature deformations of concrete and reinforcement. The distribution of relative deformations and stresses in the cross section of centrally stretched reinforced concrete elements during the formation of cracks of normal separation under the influence of negative temperatures in the range from (+15°C) to (–165°C) is given. The verification of the proposed methodology for calculating the strength and cracking force of centrally stretched reinforced concrete elements under force and temperature influences has been carried out.

Keywords: *nonlinear deformation calculation model, stress-strain state, parameters of the base points of diagrams of concrete and reinforcement deformation under the influence of negative temperatures, forced temperature deformations.*