

MIESIĘCZNIK  
POŁOCKI.

Т о м I.  
Р о к 1818.

*«Вестник Полоцкого государственного университета» продолжает традиции первого в Беларуси литературно-научного журнала «Месячник Полоцкий».*

№ 2(41), 2025

---

ВЕСТНИК ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
Серия F. Строительство. Прикладные науки

В серии F научно-теоретического журнала публикуются статьи, прошедшие рецензирование, содержащие новые научные результаты в области геодезии, геоэкологии, экологической безопасности строительства и городского хозяйства, строительства и архитектуры.

---

ВЕСНИК ПОЛАЦКАГА ДЗЯРЖАЎНАГА ЎНІВЕРСИТЭТА  
Серыя F. Будаўніцтва. Прыкладныя навукі

У серыі F навукова-тэарэтычнага часопіса друкуюцца артыкулы, якія прайшлі рэцэнзаваанне і змяшчаюць новыя навуковыя вынікі ў галіне геадэзіі, геаэкалогіі, экалагічнай бяспекі будаўніцтва і гарадской гаспадаркі, будаўніцтва і архітэктуры.

---

HERALD OF POLOTSK STATE UNIVERSITY  
Series F. Civil engineering. Applied sciences

The F series of the scientific and theoretical journal publishes peer-reviewed articles containing new scientific results in the field of geodesy, geoecology, environmental safety of construction and urban economy, construction and architecture.

---

Журнал входит в Российский индекс научного цитирования.

Электронная версия номера размещена на сайте: <https://journals.psu.by/constructions>

Адрес редакции:  
Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,  
ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, 211440, Беларусь  
тел. + 375 (214) 59 95 41, e-mail: [vestnik@psu.by](mailto:vestnik@psu.by)

Отв. за выпуск: *А.М. Нияковский.*  
Редактор *А.А. Прадидова.*

Подписано к печати 26.06.2025. Бумага офсетная 80 г/м<sup>2</sup>. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Цифровая печать.  
Усл. печ. л. 5,58. Уч.-изд. л. 6,73. Тираж 50 экз. Заказ 269.

## 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. ЛАЗОВСКИЙ<sup>1)</sup>, канд. техн. наук, доц. Д.О. ГЛУХОВ<sup>2)</sup>,  
канд. техн. наук, доц. А.М. ХАТКЕВИЧ<sup>3)</sup>, канд. техн. наук, доц. А.И. ГИЛЬ<sup>4)</sup>,  
канд. техн. наук, доц. А.И. КОЛТУНОВ<sup>5)</sup>, канд. техн. наук Э. ЧАПАРАНГАНДА<sup>6)</sup>  
(<sup>1), 3)-5)</sup> Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,  
<sup>2)</sup> ООО «СофтКлуб», Минск, <sup>6)</sup> Ботсванский международный университет науки и технологий)  
<sup>1)</sup> d.lazovski@psu.by, <sup>2)</sup> d.gluhov@psu.by, <sup>3)</sup> a.khatkevich@psu.by,  
<sup>4)</sup> a.hil@psu.by, <sup>5)</sup> a.koltunov@psu.by, <sup>6)</sup> 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)<sup>1,2,3</sup>.

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 нагрузкой<sup>4</sup> [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,

<sup>1</sup> СЕВ-FIB. Model Code for Concrete Structures. – 2013. – 402 p.

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

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

<sup>4</sup> 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 ползучести<sup>5</sup> [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  $\varepsilon_{cs}$  [3; 6].

Для бетона принимается нелинейная диаграмма состояния бетона « $\sigma_c(\sigma_{ct}) - \varepsilon_c(\varepsilon_{ct})$ » с ниспадающей ветвью<sup>6</sup> [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;  
 $f_c$  – призматическая прочность при сжатии;  
 $E_c$  – начальный модуль упругости;  
 $E_{ct}$  – начальный модуль упругости бетона при растяжении;  
 $\varepsilon_{ct1}$  – относительные деформации в вершине диаграммы деформирования;  
 $\varepsilon_{ctu}$  – предельное значение относительных деформаций бетона при растяжении.  
 Значения  $E_{ct}$ ,  $\varepsilon_{ct1}$  и  $\varepsilon_{ctu}$  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  $\varepsilon_y$  с модулем упругости  $E_s$ ; 2 – временное сопротивление арматуры  $f_u = k f_y$  (коэффициент  $k$  определяется классом деформативности (пластичности) арматуры<sup>7</sup>) и относительные деформации арматуры при разрыве  $\varepsilon_u$  (рисунок 1, б).

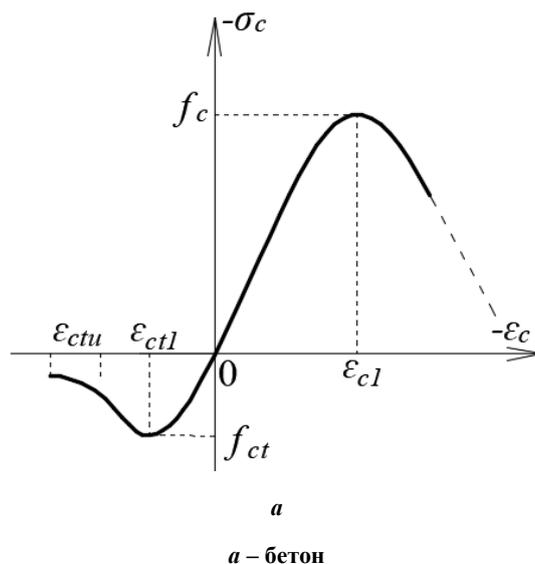
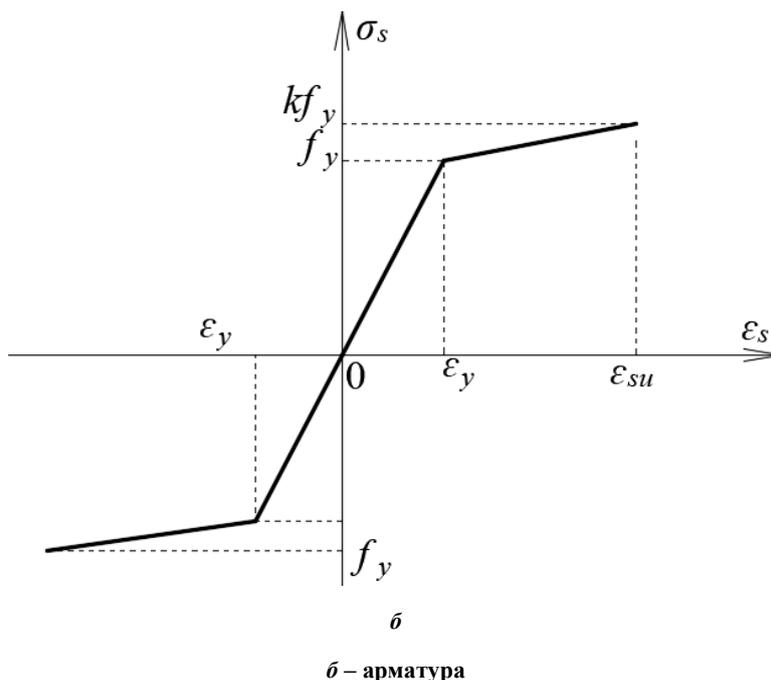


Рисунок 1. – Диаграммы деформирования при кратковременном нагружении и нормальных температурно-влажностных условиях (начало)

<sup>5</sup> См. сноску 4.

<sup>6</sup> См. сноски 1, 2 и 3.

<sup>7</sup> См. сноску 3.



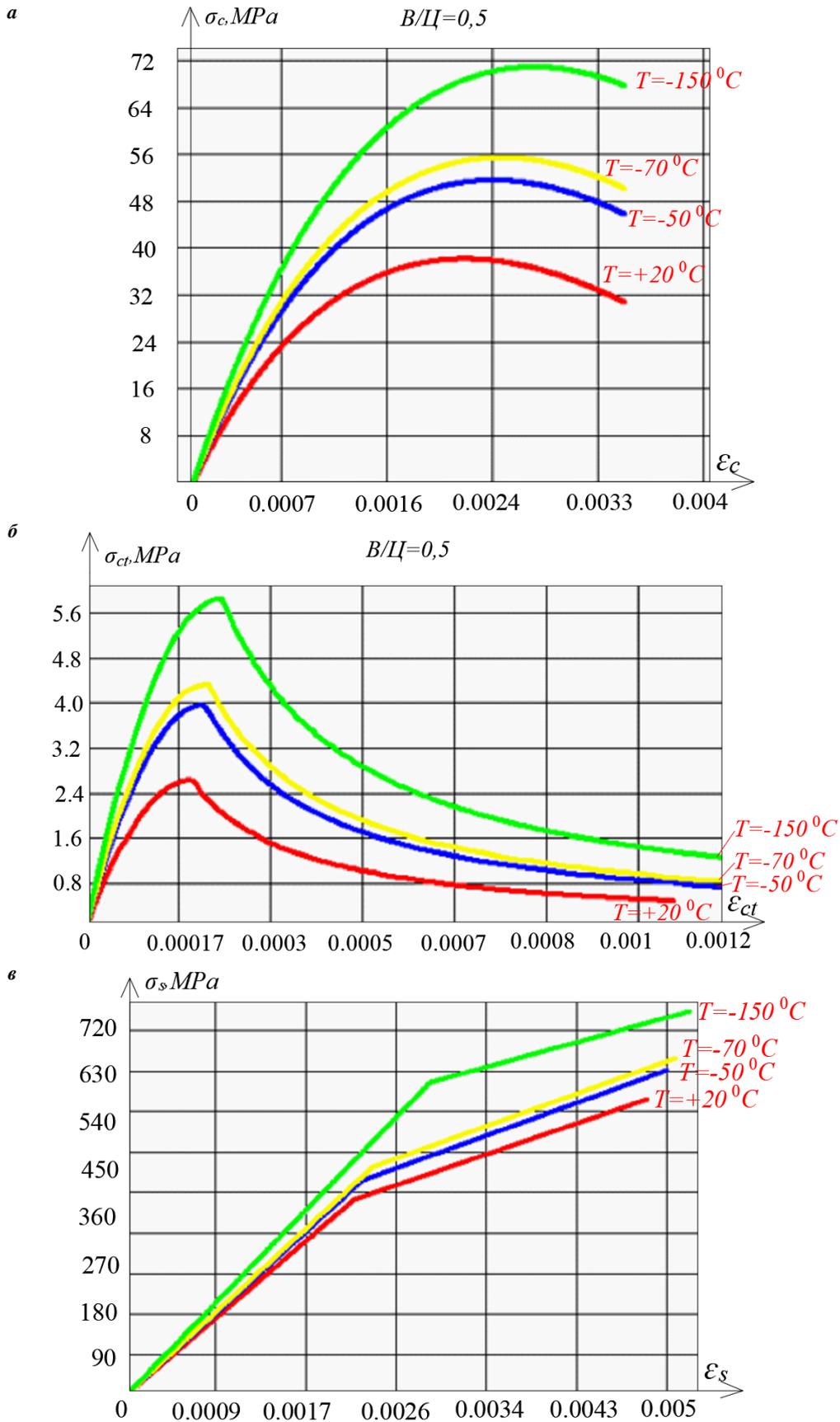
**Рисунок 1. – Диаграммы деформирования при кратковременном нагружении и нормальных температурно-влажностных условиях (окончание)**

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  $\varepsilon_{c1}$ ,  $f_{ct}$  – 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-сыхому состоянию.

Значения коэффициентов  $\beta_{Ec}$ ,  $\beta_{fc}$ ,  $\beta_{\varepsilon}$ ,  $\beta_{Es}$ ,  $\beta_{fct}$ ,  $\beta_{Es}$ ,  $\beta_{fy}$  и  $\beta_{fu}$  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  $120 \times 180$  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:  $+15^{\circ}\text{C}$ ;  $-50^{\circ}\text{C}$ ;  $-70^{\circ}\text{C}$ ;  $-165^{\circ}\text{C}$ . 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]:

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

где  $\Delta T$  – 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  $T = -165^\circ\text{C}$ :  $\varepsilon_T = (0,9 - 1,0) \cdot [-165^\circ\text{C} - (+15^\circ\text{C})] \cdot 10^{-5} = 18 \cdot 10^{-5}$ , что оказывает незначительное влияние на параметры НДС в поперечном сечении железобетонного элемента (рисунок 3).

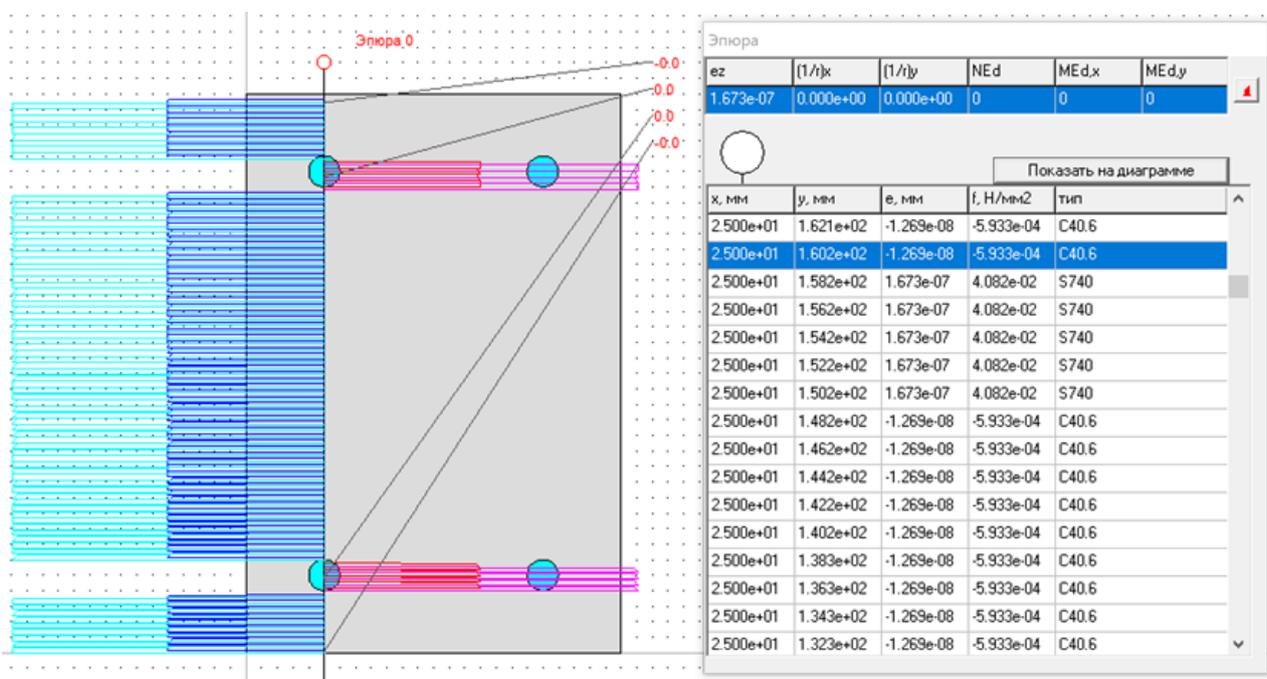


Рисунок 3. – Параметры НДС в поперечном сечении опытного образца при температуре испытания  $T = -165^\circ\text{C}$  (бетон сжат, арматура растянута)

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.

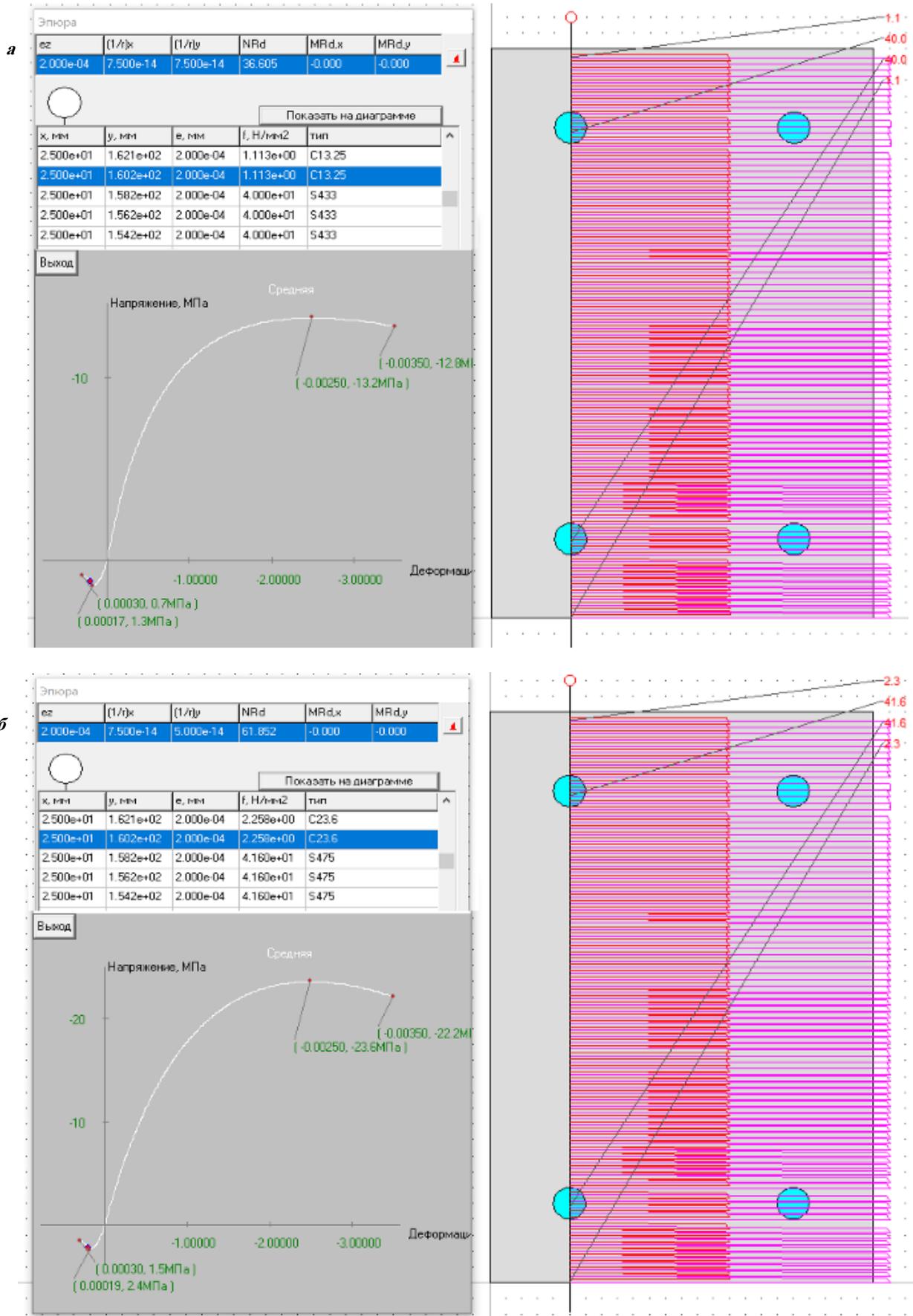


Рисунок 4. – Усилия образования трещин нормального отрыва в поперечном сечении опытных образцов при температуре испытания  $T = +15^{\circ}\text{C}$  (а);  $T = -50^{\circ}\text{C}$  (б) (начало)

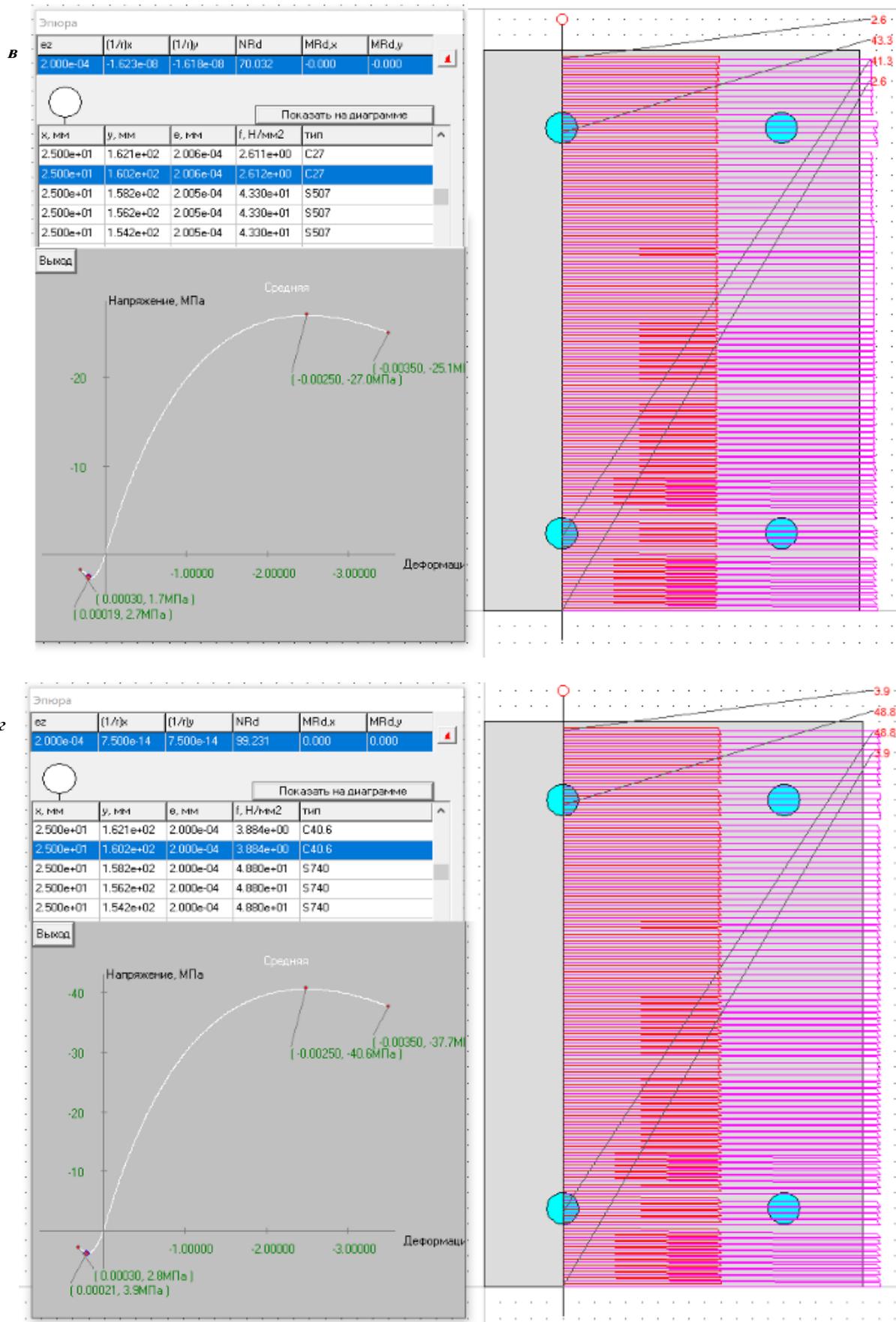


Рисунок 4. – Усилия образования трещин нормального отрыва в поперечном сечении опытных образцов при температуре испытания  $T = -70^{\circ}\text{C}$  (в);  $T = -165^{\circ}\text{C}$  (з) (окончание)

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 nagruzkoj 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 svoistvakh 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. LAZOUSKI<sup>1)</sup>, D. GLUKHOV<sup>2)</sup>, A. KHATKEVICH<sup>3)</sup>, A. HIL<sup>4)</sup>, A. KALTUNOU<sup>5)</sup>, E. CHAPARANGANDA<sup>6)</sup>**  
(<sup>1), 3)-5) *Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*, <sup>2) LLC «SoftClub», Minsk,</sup>  
<sup>6) *Botswana International University of Science and Technology*)</sup></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.*

УДК 624.012

DOI 10.52928/2070-1683-2025-41-2-13-22

**ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ КНИГОХРАНИЛИЩА  
НАЦИОНАЛЬНОЙ БИБЛИОТЕКИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ***д-р техн. наук, проф. Д.Н. ЛАЗОВСКИЙ<sup>1)</sup>, Л.М. ШОХИНА<sup>2)</sup>, А.В. ПОПРАВКО<sup>3)</sup>, Т.М. ГЛУХОВА<sup>4)</sup>**(<sup>1), 4)</sup> Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,**<sup>2)</sup> ОАО «Минскпроект», <sup>3)</sup> Проектный институт реконструкции и строительства, Новополоцк)**<sup>1) d.lazovski@psu.by, <sup>3) a.popravko@psu.by, <sup>4) dzmitry.hlukhau@outlook.com</sup></sup></sup>*

Уникальное здание Национальной библиотеки Республики Беларусь включает в себя не только градостроительные, архитектурные, технологические современные решения, но и конструкционные. Одним из таких современных конструкционных решений является применение сталежелезобетонных конструкций, сочетающих в себе преимущества металлических и железобетонных конструкций. В статье представлены результаты применения нелинейного расчета на основе диаграммного метода параметров напряженно-деформированного состояния на любой стадии работы под нагрузкой, включая стадию возведения с учетом воздействий от собственного веса стальных конструкций и свежееуложенного бетона, вынужденных деформаций усадки бетона, а также прочности, деформативности сложно нагруженных сталежелезобетонных элементов здания Национальной библиотеки Республики Беларусь при условии совместной работы жестких стальных профилей и железобетона. Предложен критерий вычисления внутреннего усилия, соответствующего прочности сталежелезобетонного элемента, в виде максимального усилия, при котором выполняются условия равновесия усилий в рассматриваемом поперечном сечении, не требующий нормирования предельной сжимаемости составляющих сталежелезобетонного элемента и позволяющий учитывать высокую степень перераспределения усилий между ними в поперечном сечении.

**Ключевые слова:** сталежелезобетонная конструкция, нелинейная деформационная модель, диаграммы деформирования материалов, гипотеза плоских сечений, напряженно-деформированное состояние, усадка бетона, стадии работы под нагрузкой, критерий разрушения.

**Введение.** На современном этапе развития строительства сталежелезобетонные конструкции широко применяются при возведении каркасных зданий и сооружений с тяжело нагруженными элементами, испытывающими сложное напряженно-деформированное состояние при внецентренном сжатии-растяжении, изгибе. Преимущества сталежелезобетонных конструкций проявляются в возможности размещения в их поперечном сечении кроме стержневой (гибкой) арматуры стальных профилей (жесткой арматуры), которые имеют большую площадь поперечного сечения и контакта с бетоном, чем стержни гибкой арматуры, так же, как и в железобетоне, стальные профили защищены бетоном от воздействия коррозии и высоких температур. Кроме того, стальные профили могут быть использованы при возведении сталежелезобетонных конструкций в качестве несущих элементов и опалубки [1–6].

Совместная работа стальных элементов, имеющих большую площадь контактной поверхности с бетоном, чем гибкая арматура круглого поперечного сечения, обеспечивается устройством различных поперечных выступов в виде жестких анкерных упоров или гибких стад-болтов, арматурных стержней, присоединенных сваркой к профилям. Это позволяет исключить взаимный сдвиг профиля относительно бетона при работе под нагрузкой<sup>1,2</sup> [7].

Расчет сталежелезобетонных элементов как комбинированной конструкции из профильной стали и железобетона производится по приведенному сечению в предположении упругой работы материалов метода допускаемых напряжений, аналогично стальным конструкциям. Дальнейшее развитие методов расчета и их приближение к действительной работе составляющих поперечное сечение материалов привело к применению для сталежелезобетонных элементов использование метода предельных усилий с пластической работой бетона (прямоугольная эпюра нормальных напряжений в бетоне сжатой зоны) и ограниченно пластической работой стали (стальные и железобетонные конструкции)<sup>3</sup> [7].

<sup>1</sup> СП 266.1325800.2016. Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования. – М.: Минстрой России, 2016. – 132 с.

<sup>2</sup> ТКП 45-5.03-16-2005 (02250). Конструкции сталежелезобетонные покрытий и перекрытий. Правила проектирования. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2006. – 71 с.

Методические рекомендации по расчету и проектированию сталежелезобетонных перекрытий. – М.: Федер. центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в стр-ве, 2018. – 62 с.

Методическое пособие по расчету и проектированию сталежелезобетонных конструкций с жесткой арматурой. – М.: Федер. центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в стр-ве, 2018. – 49 с.

Семенов В.А. Сталежелезобетонные конструкций. Область применения и основные положения СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования». Преимущества сталежелезобетонных конструкций по сравнению с традиционными решениями. Моделирование сталежелезобетонных конструкций с помощью современного инженерного ПО для проектировщиков // Презентация: Ассоциация развития стального строительства (АРСС). – М.: ООО «Техсофт». – 73 с.

Руководство по проектированию железобетонных конструкций с жесткой арматурой. – М.: Стройиздат, 1978. – 57 с.  
EN 1994-1-1:2005. Еврокод 4. Проектирование сталежелезобетонных конструкций. – Ч. 1. Общие правила для зданий и сооружений. – М., 2011. – 123 с.

Руководство для проектировщиков к Еврокоду 4 EN 1994-1-1. Проектирование сталежелезобетонных конструкций. – М.: МГСУ, 2013. – 414 с.

<sup>3</sup> См. сноски 1 и 2.

С развитием вычислительных возможностей техники стало возможным применение деформационных методов расчета к расчету поперечных сечений строительных конструкций, включая и сталежелезобетонные. Деформационный расчет позволяет получать необходимые параметры напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций для любой формы поперечного сечения, на всех стадиях их деформирования под нагрузкой [8–14], а также учитывать фактическую нелинейность работы материалов в соответствии с их диаграммами деформирования, усадку бетона при твердении и его ползучесть при длительном нагружении [15], стадийность нагружения [16–18].

Аналогично железобетонным конструкциям, нелинейная деформационная модель (НДМ) поперечного сечения сталежелезобетонных элементов основывается на представлении поперечного сечения в виде совокупности элементарных площадок, каждая из которых работает на растяжение-сжатие в соответствии с их диаграммами деформирования, в предположении линейного распределения относительных деформаций по поперечному сечению (гипотеза плоских сечений Бернулли), что справедливо для сталежелезобетонных элементов при отсутствии сдвигов между жесткой стальной арматурой и железобетоном [8].

Одним из положительных примеров применения сталежелезобетонных элементов стало возведение уникального здания Национальной библиотеки Республики Беларусь (рисунок 1). Согласно проекту и исполнению здание Национальной библиотеки объединяет два основных объема: высотное здание книгохранилища и расположенный вокруг него 2-х – 4-х этажный стилобат, где размещаются предусмотренные библиотечной технологией вспомогательные помещения. Высота здания книгохранилища составляет 72,6 м, а высота стилобата – 17,5 м [19]. Стилобат представляет собой круглое в плане здание диаметром 167,5 м [20; 21]. Основным, наиболее интересным в конструктивном замысле является высотное книгохранилище в виде объемного «симметричного кристалла», имеющего геометрическую форму ромбокубооктаэдра с габаритными размерами 30×60×60 м. В нижней наклонной части структуры предусмотрены дополнительные стержневые элементы внешнего контура, что значительно повысило жесткость и устойчивость здания. Повышенные требования к жесткости конструктивной схемы здания книгохранилища объясняются его сплошной облицовкой декоративным стеклом.

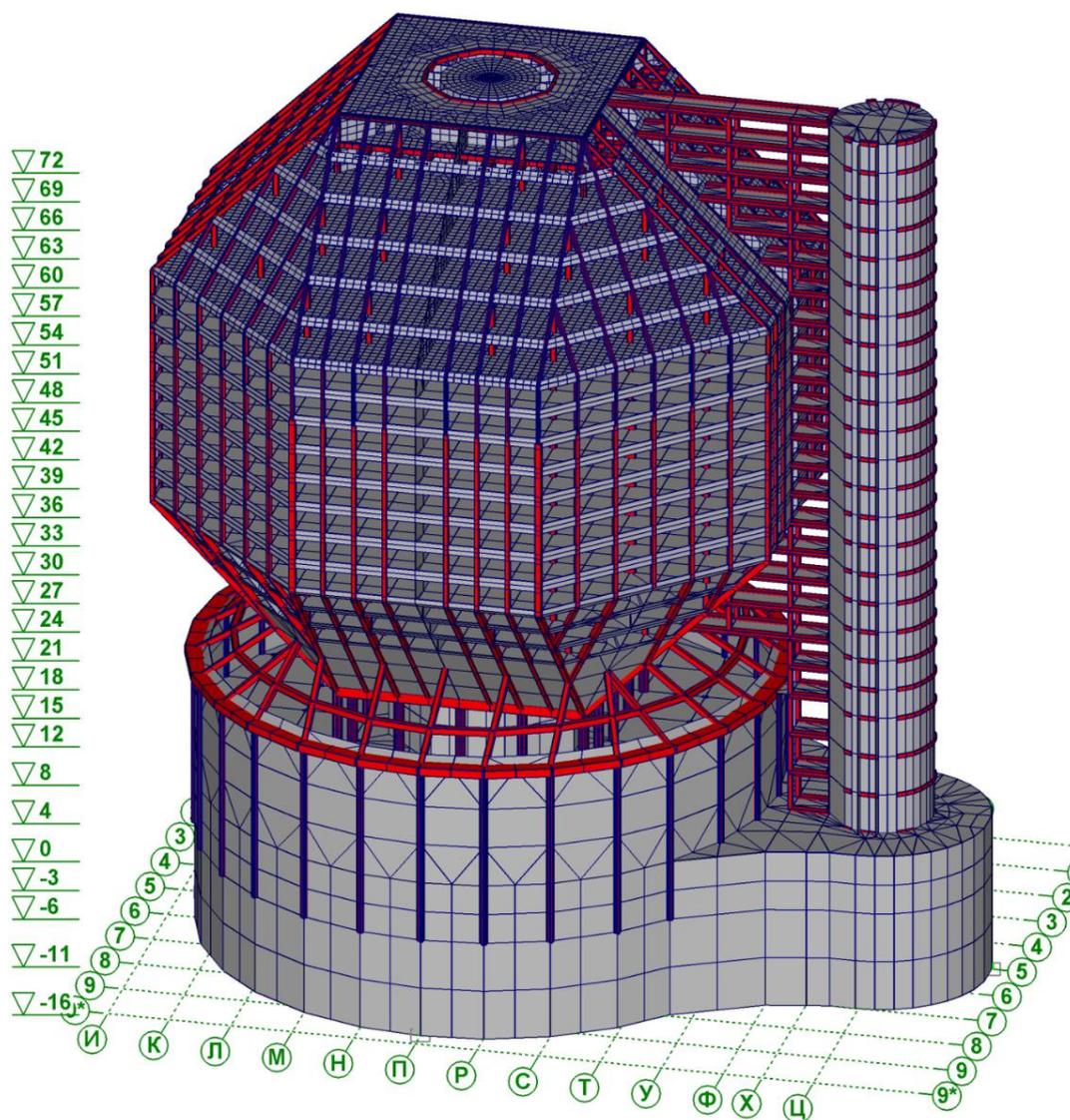


Рисунок 1. – Конструктивная схема здания Национальной библиотеки Республики Беларусь

Дополнительными стержневыми элементами, повышающими жесткость и устойчивость каркаса здания книгохранилища, являются сталежелезобетонные подкосы, опирающиеся на сталежелезобетонное опорное кольцо. Применение сталежелезобетонных элементов подкосов и опорного кольца упростило технологию бетонирования в подвесной опалубке при их отрицательном угле наклона и монтаж поддерживающих кружал.

Целью настоящего исследования является применение нелинейного подхода на основе диаграмм деформирования бетона, жесткой и гибкой арматуры с учетом стадийности нагружения стальной и железобетонной частей элемента к расчету сталежелезобетонных элементов здания книгохранилища Национальной библиотеки Республики Беларусь.

**Нелинейная деформационная модель (НДМ) для сталежелезобетонных элементов.** Согласно методу сечений для НДМ рассматривается поперечное сечение сталежелезобетонного элемента, состоящего из бетона, жесткой и гибкой арматуры, как совокупность элементарных площадок. Нормальные напряжения растяжения-сжатия элементарной площадки принимаются равномерно распределенными с величиной, соответствующей согласно диаграммам деформирования материалов относительным деформациям в центре ее тяжести.

Расчетная диаграмма деформирования бетона при сжатии принимается в виде параболической с ниспадающей ветвью и рекомендована Европейским комитетом по бетону (ЕКБ-ФИП)<sup>4,5</sup>. Для сталежелезобетонных элементов длина нисходящей ветви не ограничивается предельными относительными деформациями бетона при сжатии с целью получения полного перераспределения усилий между составляющими поперечного сечения сталежелезобетонного элемента.

Расчетная диаграмма деформирования арматуры жесткой и гибкой арматуры при сжатии и растяжении принимается билинейной (диаграмма Прандтля) с ограничением относительных деформаций их удлинения при разрыве. Для гибкой арматуры класса S500 диаграмма деформирования имеет наклонный участок, угол наклона которого зависит от класса деформативности (пластичности) арматуры<sup>6</sup>.

Система уравнений НДМ в общем случае нагружения для поперечного сечения сталежелезобетонного элемента при действии продольного усилия  $N$  с эксцентриситетами  $\varepsilon_x$  и  $\varepsilon_y$  вдоль соответствующих осей относительно центра тяжести сечения элемента и изгибающих моментов  $M_x$  и  $M_y$  имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum \sigma_c(\varepsilon_c(x_c, y_c))A_c(x_c, y_c)(x_c - x_0) + \sum \sigma_s(\varepsilon_s(x_s, y_s))A_s(x_s, y_s)(x_s - x_0) - M_x - N \cdot e_{0,x} = 0 \\ \sum \sigma_c(\varepsilon_c(x_c, y_c))A_c(x_c, y_c)(y_c - y_0) + \sum \sigma_s(\varepsilon_s(x_s, y_s))A_s(x_s, y_s)(y_s - y_0) - M_y - N \cdot e_{0,y} = 0 \\ \sum \sigma_c(\varepsilon_c(x_c, y_c))A_c(x_c, y_c) + \sum \sigma_s(\varepsilon_s(x_s, y_s))A_s(x_s, y_s) - N = 0 \\ \varepsilon_c(x_c, y_c) = \varepsilon_{c,II} + \varepsilon_z + \frac{1}{r_x}(x_c - x_0) + \frac{1}{r_y}(y_c - y_0) \\ \varepsilon_s(x_s, y_s) = \varepsilon_{s,II} + \varepsilon_z + \frac{1}{r_x}(x_s - x_0) + \frac{1}{r_y}(y_s - y_0) \end{array} \right. , \quad (1)$$

где  $\sigma(x,y)$ ,  $\varepsilon(x,y)$  – соответственно нормальные напряжения, относительные деформации в элементарной площадке составляющих поперечное сечение с координатами  $(x,y)$ ;

$A_c(x,y)$ ,  $A_s(x,y)$  – площадь поперечного сечения элементарной площадки соответственно бетона, жесткой или гибкой арматуры с координатами  $(x,y)$ ;

$(x_0, y_0)$  – координаты центра тяжести поперечного сечения сталежелезобетонного элемента;

$1/r_x$ ,  $1/r_y$  – кривизна продольной оси сталежелезобетонного элемента в плоскости соответственно осей  $x$ ,  $y$ ;

$\varepsilon_z$  – относительная деформация в центре тяжести поперечного сечения сталежелезобетонного элемента, которая равна:

$$\varepsilon_z = \frac{N}{\sum E_c A_c + \sum E_s A_s}. \quad (2)$$

Влияние продольного изгиба при вычислении параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) внецентренно сжатого сталежелезобетонного элемента на любой стадии его деформирования, включая предельную по прочности, производится коэффициентом  $\eta$  по формуле<sup>7</sup>:

<sup>4</sup> СЕВ-FIB Model Code for Concrete Structures. – 2010. URL: <https://www.fib-international.org/publications/fib-bulletins/model-code-2010-first-complete-draft,-vol-1-pdf-detail.html>.

<sup>5</sup> СП 5.03.01-2020. Бетонные и железобетонные конструкции. – Минск: РУП «Стройтехнорм» М-ва архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2020. – 236 с.

<sup>6</sup> См. сноску 5.

<sup>7</sup> См. сноски 1, 4 и 5.

$$e_0 = \left( \sqrt{e_{0,x}^2 + e_{0,y}^2} \right) \cdot \eta, \quad (3)$$

где

$$\eta = \frac{1}{1 - N/N_{crit}}; \quad (4)$$

$$N_{crit} = \frac{\pi^2 \cdot (EI)}{l_0^2}; \quad (5)$$

$l_0$  – расчетная длина сталежелезобетонного элемента;

$(EI)$  – жесткость сталежелезобетонного элемента на расчетной стадии его деформирования,

$$EI = \frac{\sqrt{(N \cdot e_{0,x} + M_x)^2 + (N \cdot e_{0,y} + M_y)^2}}{\sqrt{\left(\frac{1}{r_x}\right)^2 + \left(\frac{1}{r_y}\right)^2}}. \quad (6)$$

Критерием образования трещин нормального отрыва в сталежелезобетонном элементе принимается достижение бетоном крайней по отношению к нейтральной линии элементарной площадки предельных деформаций растяжения. Внутреннее усилие от внешней нагрузки при этом соответствует усилию образования трещин. Критерием разрушения сталежелезобетонного элемента принимается максимальное значение внутреннего усилия от внешних воздействий  $N (M)$ , которое воспринимает элемент, и при котором выполняются условия равновесия системы уравнений (1).

В процессе возведения жесткая профильная арматура сталежелезобетонных элементов воспринимает воздействия собственного веса и веса других сборных элементов, монолитного бетона, монтажных нагрузок. Это вызывает появление исходного НДС в жесткой арматуре, отличного от нулевого. Стадийность работы под нагрузкой с учетом исходного НДС при изготовлении сталежелезобетонных элементов [16–18] в НДМ производится суммированием параметров НДС в виде относительных деформаций каждой элементарной площадки жесткой арматуры расчетного поперечного сечения с относительными деформациями  $\varepsilon_{s,I}$ , вычисленными на первом этапе расчета из системы уравнений (7):

$$\begin{cases} \sum \sigma_s(\varepsilon_s(x_s, y_s)) A_s(x_s, y_s)(x_s - x_0) - M_{x,I} - N_I \cdot e_{0,x} = 0 \\ \sum \sigma_s(\varepsilon_s(x_s, y_s)) A_s(x_s, y_s)(y_s - y_0) - M_{y,I} - N_I \cdot e_{0,y} = 0 \\ \sum \sigma_s(\varepsilon_s(x_s, y_s)) A_s(x_s, y_s) - N_I = 0 \\ \varepsilon_{s,I}(x_s, y_s) = \varepsilon_{z,I} + \frac{1}{r_{x,I}}(x_s - x_0) + \frac{1}{r_{y,I}}(y_s - y_0) \end{cases}. \quad (7)$$

Кроме того, при бетонировании сталежелезобетонных конструкций и твердении бетона на портландцементе на строительной площадке проявляются усадочные деформации, которые сдерживаются стальными профилями с большой контактной поверхностью и гибкой арматурой. Учитывая высокую степень армирования сталежелезобетонных элементов, возникает возможность появления усадочных трещин. При действии вынужденных усадочных относительных деформаций сжатия в бетоне в жесткой и гибкой арматуре появляются относительные деформации сжатия, а в бетоне – вследствие сопротивления жесткой и гибкой арматуры относительные деформации растяжения.

На второй стадии расчета при действии вынужденных относительных деформаций усадки бетона при его твердении поперечное сечение сталежелезобетонного элемента представляется без увеличения внешней нагрузки. Относительную деформацию полной усадки бетона  $\varepsilon_{cs}(t, t_s)$  в момент времени  $t$ , имеющего возраст  $t_s$  к моменту начала воздушно-сухого хранения, вычисляют по формуле<sup>8</sup>:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cbs}(t) + \varepsilon_{cds}(t, t_s), \quad (8)$$

где  $\varepsilon_{cbs}(t)$  – относительная деформация базовой усадки бетона;  
 $\varepsilon_{cds}(t, t_s)$  – относительная деформация усадки высыхания бетона.

<sup>8</sup> См. сноску 5.

Система уравнений для расчета параметров НДС сталежелезобетонного элемента на второй стадии расчета преобразуется к виду:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum \sigma_{c,II}(\varepsilon_{c,II}(x_c, y_c))A_c(x_c, y_c)(x_c - x_0) + \sum \sigma_{s,II}(\varepsilon_{s,II}(x_s, y_s))A_s(x_s, y_s)(x_s - x_0) - M_{x,I} - N_I \cdot e_{0,x} = 0 \\ \sum \sigma_{c,II}(\varepsilon_{c,II}(x_c, y_c))A_c(x_c, y_c)(y_c - y_0) + \sum \sigma_{s,II}(\varepsilon_{s,II}(x_s, y_s))A_s(x_s, y_s)(y_s - y_0) - M_{y,I} - N_I \cdot e_{0,y} = 0 \\ \sum \sigma_{c,II}(\varepsilon_{c,II}(x_c, y_c))A_c(x_c, y_c) + \sum \sigma_{s,II}(\varepsilon_{s,II}(x_s, y_s))A_s(x_s, y_s) - N_I = 0 \\ \varepsilon_{c,II}(x_c, y_c) = \varepsilon_{z,I} + \frac{1}{r_x}(x_c - x_0) + \frac{1}{r_y}(y_c - y_0) + \varepsilon_{cs}(t, t_s) \\ \varepsilon_{s,II}(x_s, y_s) = \varepsilon_{s,I} + \frac{1}{r_x}(x_s - x_0) + \frac{1}{r_y}(y_s - y_0) + \varepsilon_{cs}(t, t_s) \end{array} \right. \quad (9)$$

Полученные на второй стадии расчета параметры НДС сталежелезобетонного элемента будут являться исходными на последующих стадиях его работы под нагрузкой (система уравнений (1)).

**Расчет сталежелезобетонных элементов по НДМ.** Сталежелезобетонными элементами здания книгохранилища Национальной библиотеки Республики Беларусь являются: опорное кольцо ОК радиусом 27650 мм; наклонные элементы НЭ1...НЭ3, поддерживающие, консольно выступающие, окаймляющие железобетонные балки перекрытий, общей длиной 25400 мм и расчетной (с учетом раскрепления по длине балками перекрытий) –  $l_0 = 4240$  мм; подкосы ПК, опирающиеся одним концом на опорное кольцо, другим – на наклонные элементы в месте их соединения с окаймляющими балками перекрытий на отметке 18 600 м, длиной 12 100 мм ( $l_0 = 6050$  мм) (рисунок 2). Сталежелезобетонный элемент опорного кольца под действием монтажных усилий, собственного веса и внутренних усилий от действующих нагрузок испытывает растяжение (+) с изгибом, остальные сталежелезобетонные элементы – сжатие (–) с изгибом. Расчетные усилия в рассматриваемых сталежелезобетонных элементах в момент времени их бетонирования ( $N_I, M_I$ ) и от расчетных эксплуатационных нагрузок ( $N, M$ ) приведены в таблице 1.

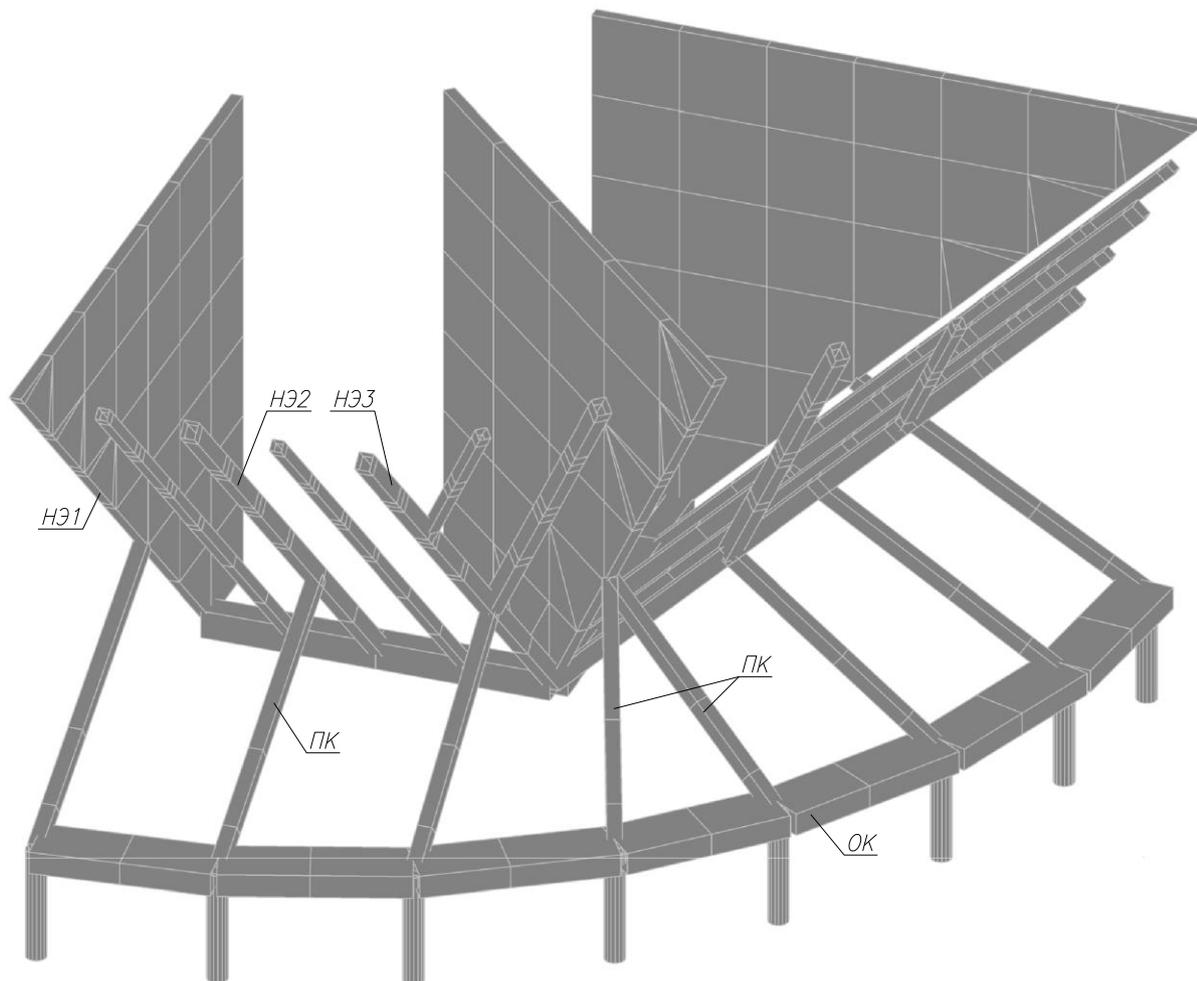
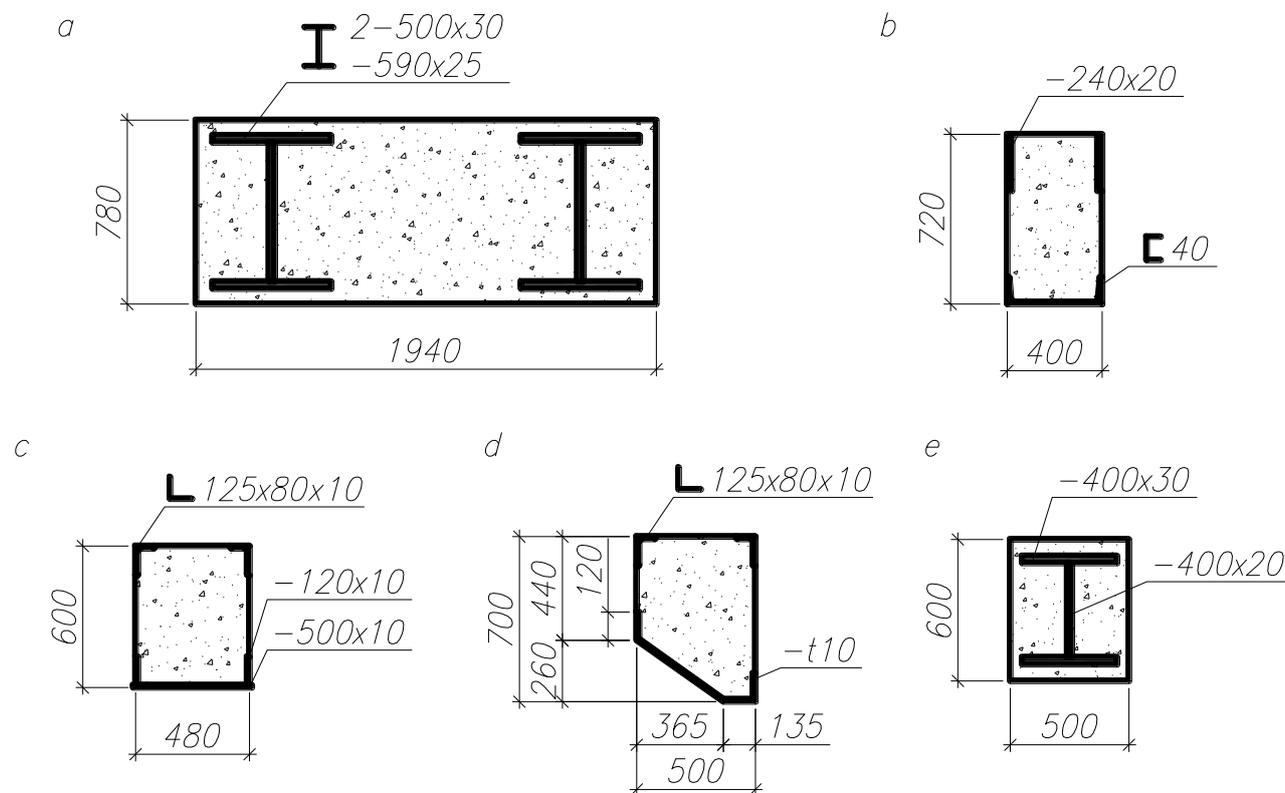


Рисунок 2. – Сталежелезобетонные элементы здания книгохранилища

Таблица 1. – Расчетные усилия в сталежелезобетонных элементах

Шифр элемента	$N_i$ , кН	$M_i$ , кН·м	$\eta_i$	$N$ , кН	$M$ , кН·м	$\eta$	$N_u$ , кН	$M_u$ , кН·м	$\eta_u$
ОК	+4250	168	–	+5285	280	–	+26823	1393	–
НЭ1	–43	26	1,000	–220	150	1,001	–2152	1498	1,027
НЭ2			1,000			1,001	–1743	1208	1,026
НЭ3			1,001			1,001	–1777	1226	1,018
ПК	–1364	18	1,000	–3560	21	1,001	–13587	461	2,679

Поперечные сечения рассматриваемых сталежелезобетонных элементов с жесткой арматурой из прокатных и сварных профилей приведены на рисунке 3. Все стальные профили сталежелезобетонных элементов выполнены из стали С345, за исключением наклонных элементов НЭ1...НЭ3, которые изготовлены из стали С245. Бетон на бездобавочном портландцементе принят класса С25/30.



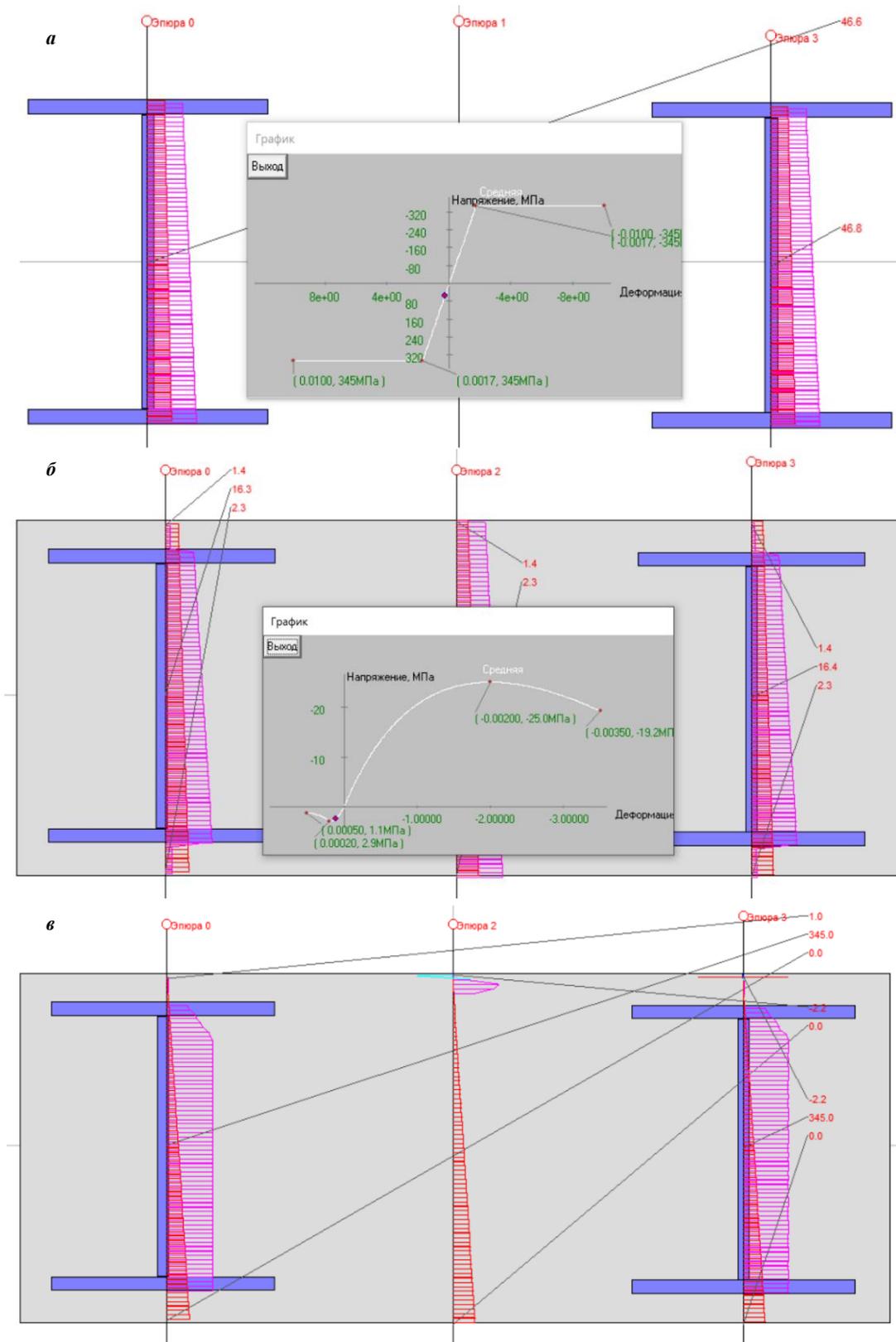
**a** – опорное кольцо ОК; **b** – наклонный элемент НЭ1; **c** – наклонный элемент НЭ2; **d** – наклонный элемент НЭ3; **e** – подкосы ПК

**Рисунок 3. – Поперечные сечения сталежелезобетонных элементов с жесткой арматурой из прокатных и сварных профилей**

Пример вычисления параметров напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонного элемента по предлагаемой методике для растянуто изгибаемого опорного кольца при действии усилий от внешних воздействий при бетонировании, а также при расчетных и предельных внутренних усилиях показан на рисунке 4.

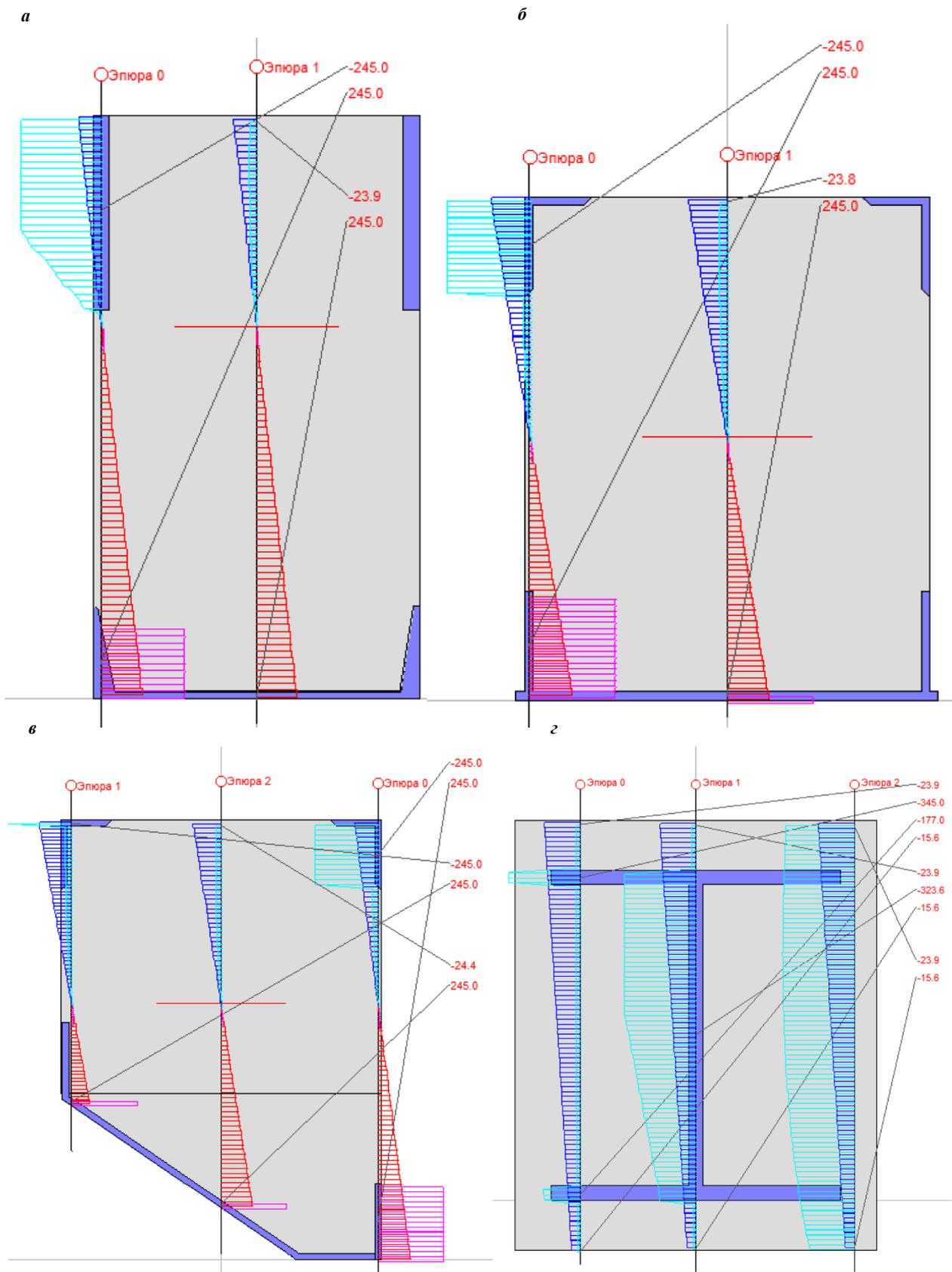
Результаты расчета показывают, что вынужденные деформации усадки бетона  $\varepsilon_{cs}(t, t_s) = 0,00025$  вызывают появление в бетоне растягивающих напряжений, а в жесткой профильной арматуре – сжимающих, частично гасящих растягивающие напряжения от внешних воздействий. При действии эксплуатационных нагрузок в бетоне опорного кольца отсутствуют трещины нормального отрыва. В предельном по прочности состоянии при растяжении с изгибом в опорном кольце усилия от внешних воздействий воспринимает только стальная арматура.

Распределение параметров НДС по высоте поперечного сечения внецентренно сжатых сталежелезобетонных элементов с учетом их продольного изгиба, начального напряженно-деформированного состояния в момент времени бетонирования и вынужденных деформаций усадки твердеющего бетона на портландцементе в предельном по прочности состоянии приведено на рисунке 5. Результаты вычисления предельных усилий ( $N_u$ ,  $M_u$ ) рассматриваемых сталежелезобетонных элементов приведены в таблице 1.



**а** – при действии растягивающего продольного усилия  $N_I = 4251$  кН и изгибающего момента  $M_{sдI} = 168$  кН·м перед бетонированием; **б** – то же, при тех же внутренних усилиях и вынужденных деформаций усадки бетона после его твердения; **в** – при действии предельного растягивающего продольного усилия  $N_u = 26823$  кН и изгибающего момента  $M_u = 1393$  кН·м (цифры красным цветом справа от поперечного сечения – нормальные напряжения в МПа)

**Рисунок 4.** – Распределение нормальных напряжений и относительных деформаций и по поперечному сечению сталежелезобетонного элемента опорного кольца ОК



**a – НЭ1; б – НЭ2; в – НЭ3; г – ПК при действии предельных по прочности внутренних усилий (цифры красным цветом справа от поперечного сечения – нормальные напряжения в МПа)**

**Рисунок 5. – Распределение относительных деформаций и нормальных напряжений по поперечному сечению сжатой изгибаемых сталежелезобетонных элементов**

Расчет предельных значений внутренних усилий сталежелезобетонных элементов Национальной библиотеки Республики Беларусь показывает существенный запас прочности при учете в работе бетона при сжатии.

**Заключение.** На примере сжатых (растянутых) с изгибом сталежелезобетонных элементов Национальной библиотеки Республики Беларусь продемонстрирована применимость нелинейной деформационной модели для вычисления их параметров НДС на стадии их возведения с учетом действующих усилий и вынужденных деформаций усадки бетона при бетонировании, при работе под нагрузкой, включая предельную.

Учет усадки бетона позволяет повысить надежность расчета параметров НДС сталежелезобетонных элементов, предусмотреть возможность появления усадочных трещин на стадии их бетонирования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев А.П. Железобетон с жесткой арматурой / Нар. ком. по стр.-ву. Техн. упр. Центр. науч.-исслед. ин-та пром. сооружений (ЦНИПС). – М.; Л.: Гос. изд. строит. лит., 1941. – 123 с.
2. Расчет сталежелезобетонной колонны высотного дома на косое внецентренное сжатие / А.М. Десяткин, Д.В. Конин, А.С. Мартиросян и др. // Жилищ. стр.-во. – 2015. – № 5. – С. 92–95.
3. Тамразян А.Г., Лолейт А.Ф. История развития теории железобетона: биографический очерк. – М.: МГСУ, 2018. – 184 с.
4. Бабалич В.С., Андросов Е.Н. Сталежелезобетонные конструкции и перспектива их применения в строительной практике России // Успехи современ. науки. – 2017. – Т. 4, № 4. – С. 205–208.
5. Кибирева Ю.А., Астафьева Н.С. Применение конструкций из сталежелезобетона // Экология и стр.-во. – 2018. – № 2. – С. 27–34. DOI: 10.35688/2413-8452-2018-02-004.
6. Виноградова Н.А., Швец Г.А. Исследования сталежелезобетонных изгибаемых конструкций (обзор) // Вестн. инженер. шк. ДВФУ. – 2020. – № 1(42). – С. 114–127. DOI: 10.24866/2227-6858/2020-1-12.
7. Тонких Г.П., Чесноков Д.А. Экспериментальное исследование сдвигового соединения монолитных сталежелезобетонных перекрытий на угловых анкерных упорах // Вестн. МГСУ. – 2021. – № 2. – С. 144–152. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.144-152.
8. Мухамедиев Т.А., Старчикова О.И. Расчет прочности сталежелезобетонных колонн с использованием деформационной модели // Бетон и железобетон. – 2006. – № 4(541). – С. 18–20.
9. Карпенко Н.И., Соколов Б.С., Радайкин О.В. К расчету прочности, жесткости и трещиностойкости внецентренно сжатых железобетонных элементов с применением нелинейной деформационной модели // Изв. Казан. гос. архитектур.-строит. ун-та. – 2013. – № 4(26). – С. 113–120.
10. Кудинов О.В. Новый подход к оценке прочности сталежелезобетонных перекрытий // Бетон и железобетон. – 2010. – № 2(563). – С. 14–16.
11. Арленинов П.Д., Крылов С.Б. Современное состояние нелинейных расчетов железобетонных конструкций // Сейсмостойкое стр.-во. Безопасность сооружений. – 2017. – № 3. – С. 50–53.
12. Gholamhoseini A., Gilbert R.L., Bradford M. Long-Term Behavior of Continuous Composite Concrete Slabs with Steel Decking // *ACI Structural Journal*. – 2018. – Vol. 115, № 2. – P. 439–449. DOI: 10.14359/51701133.
13. Карпенко Н.И., Мухамедиев Т.А., Петров А.Н. Исходные и трансформированные диаграммы деформирования бетона и арматуры // Напряженно-деформированное состояние бетонных и железобетонных конструкций: сб. науч. тр. / под ред. С.М. Крылова, Т.А. Мухамедиева. – М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1986. – С. 7–25.
14. Бондаренко В.М., Бондаренко С.В. Инженерные методы нелинейной теории железобетона. – М.: Стройиздат, 1982. – 287 с.
15. 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. гос. техн. ун-та. Сер. Техн. науки (стр.-во, машиностроение, геоэкология). Экон. науки. – 2021. – № 2(125). – С. 7–12.
16. Лазовский Д.Н. Усиление железобетонных конструкций эксплуатируемых строительных сооружений. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 1998. – 240 с.
17. Нелинейный расчет изгибаемых сталежелезобетонных элементов / Д.Н. Лазовский, Д.О. Глухов, А.М. Хаткевич и др. // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Стр.-во. Приклад. науки. – 2024. – № 2(37). – С. 9–23. DOI: 10.52928/2070-1683-2024-37-2-9-23.
18. Лазовский Д.Н., Гиль А.И., Глухов Д.О. Деформационный подход к расчету сопротивления сжатию сталежелезобетонных элементов // Вестн. МГСУ. – 2024. – Т. 19, вып. 9. – С. 1469–1483. URL: <https://elib.psu.by/handle/123456789/45682>.
19. Архитектурно-конструктивные решения уникального здания Национальной библиотеки Беларуси / М.К. Виноградов, В.В. Крамаренко, Л.М. Шохина и др. // Строит. наука и техника. – 2005. – № 1. – С. 8–13.
20. Шохина Л.М. Конструктивные решения нового здания библиотеки // Архитектура и строительство. – 2003. – № 2. – С. 2–3.
21. Конструктивные решения высотного здания книгохранилища Национальной библиотеки Беларуси / Д.Н. Лазовский, А.В. Поправко, Т.М. Пецольд и др. // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром.-сть. Приклад. науки. – 2006. – № 9. – С. 2–7.

## REFERENCES

1. Vasiliev A.P. *Reinforced concrete with rigid reinforcement* / People's Committee for Construction. Tech. Manage. Central Research Institute of Industrial Structures (TsNIPS). – Moscow; Leningrad: State Publishing House of Construction Literature, 1941. – 123 p.
2. Desyatkin M.A. Calculation of a steel-reinforced concrete column of a high-rise building for oblique eccentric compression / A.M. Desyatkin, D.V. Konin, A.S. Martirosyan, V.I. Travush // *Housing construction*. – 2015. – № 5. – P. 92–95.
3. Tamrazyan A.G., Loley A.F. *History of the development of the theory of reinforced concrete: a biographical essay*. – Moscow: MGSU, 2018. – 184 p.
4. Babalich V.S., Androsov E.N. Composite reinforced concrete structures and the prospects of their application in the construction practice of Russia // *Advances in modern science*. – 2017. – Vol. 4, № 4. – P. 205–208.
5. Kibireva Yu.A., Astafieva N.S. Application of composite structures // *Ecology and Construction*. – 2018. – № 2. – P. 27–34. DOI: 10.35688/2413-8452-2018-02-004.

6. Vinogradova N.A., Shvets G.A. Research of composite reinforced concrete bending structures (review) // *Bulletin of the FEFU Engineering School*. – 2020. – № 1(42). – P. 114–127. DOI: 10.24866/2227-6858/2020-1-12.
7. Tonkikh G.P., Chesnokov D.A. Experimental study of the shear connection of monolithic composite floors on corner anchor supports // *Bulletin of MGSU*. – 2021. – № 2. – P. 144–152. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.144-152.
8. Mukhamediyev T.A., Starchikova O.I. Calculation of composite columns strength using deformation model // *Concrete and reinforced concrete*. – 2006. – № 4(541). – P. 18–20.
9. Karpenko N.I. On calculation of strength, rigidity and crack resistance of eccentrically compressed reinforced concrete elements using nonlinear deformation model / N.I. Karpenko, B.S. Sokolov, O.V. Radaykin // *Bulletin of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. – 2013. – № 4(26). – P. 113–120.
10. Kudinov O.V. New approach to assessment of composite floors strength // *Concrete and reinforced concrete*. – 2010. – № 2(563). – P. 14–16.
11. Arleninov P.D., Krylov S.B. Current state of nonlinear calculations of reinforced concrete structures // *Earthquake engineering. Safety of structures*. – 2017. – № 3. – P. 50–53.
12. Gholamhoseini A., Gilbert R.I., Bradford M. Long-Term Behavior of Continuous Composite Concrete Slabs with Steel Decking // *ACI Structural Journal*. – 2018. – Vol. 115, № 2. – P. 439–449. DOI: 10.14359/51701133.
13. Karpenko N.I., Mukhamediyev T.A., Petrov A.N. Initial and transformed diagrams of deformation of concrete and reinforcement // *Coll. Stress-strain state of concrete and reinforced concrete structures*. – M.: NIIZHB, 1986. – P. 7–25.
14. Bondarenko V.M., Bondarenko S.V. *Engineering methods of nonlinear theory of reinforced concrete*. – M.: Stroyizdat, 1982. – 287 p.
15. Lazovsky D.N. Accounting for creep and shrinkage of concrete according to SP 5.03.01-2020 in the calculation of reinforced concrete structures based on the deformation calculation model / D.N. Lazovsky, V.V. Tur, D.O. Glukhov, E.D. Lazovsky // *Bulletin of the Brest State Technical University. Series Technical sciences (construction, mechanical engineering, geocology). Economic sciences*. – 2021. – № 2(125). – P. 7–12.
16. Lazovsky D.N. *Strengthening of reinforced concrete structures of operated building structures* / D.N. Lazovsky. – Novopolotsk: Polotsk State University, 1998. – 240 p.
17. Nonlinear calculation of bending steel-reinforced concrete elements / D.N. Lazovsky, D.O. Glukhov, A.M. Khatkevich [et al.] // *Bulletin of Polotsk State University. Series F, Construction. Applied Sciences*. – 2024. – № 2(37). – P. 9–23. DOI: 10.52928/2070-1683-2024-37-2-9-23.
18. Lazovsky D.N., Gil A.I., Glukhov D.O. Deformation approach to calculating the compressive strength of composite steel elements // *Bulletin of MGSU*. – 2024. – Vol. 19, Issue 9. – P. 1469–1483. URL: <https://elib.psu.by/handle/123456789/45682>.
19. Architectural and structural solutions for the unique building of the National Library of Belarus / M.K. Vinogradov, V.V. Kramarenko, L.M. Shokhina, T.M. Petzold, D.N. Lazovsky, V.A. Potershchuk // *Construction Science and Technology*. – 2005. – № 1. – P. 8–13.
20. Shokhina L.M. Structural solutions for the new library building // *Architecture and Construction*. – 2003. – № 2. – P. 2–3.
21. Structural solutions for the high-rise building of the book depository of the National Library of Belarus / D.N. Lazovsky, A.V. Popravko, T.M. Petzold, L.M. Shokhina // *Bulletin of Polotsk State University. Series B, Applied Sciences*. – 2006. – № 9. – P. 2–7.

Поступила 28.03.2025

#### STRENGTH ASSESSMENT OF STEEL-REINFORCED CONCRETE STRUCTURES OF THE BOOK DEPOSIT OF THE NATIONAL LIBRARY OF THE REPUBLIC OF BELARUS

**D. LAZOUSKI<sup>1)</sup>, L. SHOKHINA<sup>2)</sup>, A. POPRAVKO<sup>3)</sup>, T. GLUKHOVA<sup>4)</sup>**  
<sup>(1), 4)</sup> *Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*, <sup>2)</sup> *OJSC «Minskproekt»*,  
<sup>3)</sup> *Project Institute for Reconstruction and Construction, Novopolotsk*)

*The unique building of the National Library of the Republic of Belarus includes not only urban planning, architectural, technological modern solutions, but also structural ones. One of such modern structural solutions is the use of steel-reinforced concrete structures that combine the advantages of metal and reinforced concrete structures. The article presents the results of applying a nonlinear calculation based on the diagrammatic method of stress-strain state parameters at any stage of work under load, including the construction stage, paying attention to the effects of the dead weight of steel structures and freshly laid concrete, accounting for forced deformations of concrete shrinkage, as well as the strength, deformability of complexly loaded steel-reinforced concrete elements of the building of the National Library of the Republic of Belarus, subject to the joint operation of rigid steel sections and reinforced concrete. A criterion for calculating the internal force corresponding to the strength of a composite element is proposed in the form of the maximum force at which the conditions of force equilibrium in the cross-section under consideration are met, which does not require standardization of the ultimate compressibility of the composite element components and allows taking into account the high degree of force redistribution between them in the cross-section.*

**Keywords:** *composite structure, nonlinear deformation model, material deformation diagrams, plane section hypothesis, stress-strain state, concrete shrinkage, stages of work under load, failure criterion.*

УДК 628.16

DOI 10.52928/2070-1683-2025-41-2-23-30

**ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ УДАЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА И МАРГАНЦА  
НА КВАРЦЕВОМ ПЕСКЕ И СОРБЕНТЕ АС****Е. С. ВЕЛЮГО****ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6165-1929>****канд. техн. наук, доц. А. А. ЕРМАК****ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4398-1796>****канд. техн. наук, доц. В. Д. ЮЩЕНКО****ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9485-3760>****(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)**

*В статье описывается сравнительный анализ структурных и энергетических параметров свежего и бывшего в эксплуатации песка и сорбента марки АС методом адсорбции паров воды с использованием порометра BELSORP MAX. Обработка изотерм адсорбции-десорбции выполнена в программном комплексе BELMaster MicrotracBEL Corp с расчетом удельной поверхности, суммарного объема, среднего размера пор и энергии адсорбции паров воды по методам BET, Ленгмюра и Дубинина-Астахова (DA). Наблюдается увеличение удельной поверхности и пористости бывшего в эксплуатации песка и сорбента марки АС, что свидетельствует о структурных изменениях в процессе их эксплуатации: увеличении удельной поверхности и пористости. Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности повторного использования отработанного песка и сорбента марки АС после регенерации, а также о необходимости учета изменений их свойств при проектировании систем очистки.*

**Ключевые слова:** природные воды, качество воды, песчаная загрузка, сорбент АС, гидрохимическая модель, порометр.

**Введение.** Важным элементом фильтров очистки природной воды является фильтрующая загрузка, материалы которой должны обеспечивать стабильность воды, эффективное задержание и удержание загрязнений в своей среде, а также исключать наличие токсичных элементов и веществ, способных ухудшить качество фильтрата. Кроме того, нужно, чтобы эти материалы обладали высокой механической прочностью и химической стойкостью к измелчению и истиранию в процессе регенерационной промывки обратным током воды. Следует учитывать доступность такого материала и его стоимость. В практике водоподготовки, особенно при малых объемах водопотребления с любым концентрационным исходным составом, в качестве загрузки напорных фильтров широко используют песок и группу сорбентов (например, минеральный сорбционный материал марки АС), имеющих в своем составе алюмосиликатную группу [1]. К адсорбентам предъявляется ряд дополнительных требований: высокая удельная поверхность, объем и распределение пор по размерам, сорбционная емкость, термостабильность и пр.<sup>1</sup>

**Основная часть.** Цель данного исследования заключается в разработке гидрохимической модели процессов удаления железа, марганца из природной воды на указанных фильтрующих материалах. Данная модель может быть использована для изобретения экологически безопасных и эффективных технологий адсорбционной очистки воды. Для этого были определены и проанализированы изменения в пористой структуре и поверхностных свойствах песка и сорбента марки АС до и после их эксплуатации в промышленном фильтре обезжелезивания, что критически важно для понимания механизмов деградации и регенерации этих материалов.

Проведенные исследования влияния степени аэрации воды на удаление железа и марганца при обработке природной воды в напорных фильтрах обезжелезивания с использованием в качестве адсорбентов песка и сорбента марки АС [2; 3] показали их высокую адсорбционную ёмкость по отношению к этим элементам. В то же время эффективность снижения содержания в воде аммонийных соединений и перманганатной окисляемости была очень незначительна и составляла всего 3–10% (рисунок 1). В работе [4] было доказано отрицательное влияние аммонийного азота на удаление железа и марганца из подземной воды. В связи с этим необходимо рассмотреть химические процессы, протекающие при очистке воды, в том числе и при частичном снижении (разложении) аммонийного азота.

Исследования были проведены в производственных условиях на природной воде сложного состава, характеризующейся высоким уровнем загрязнений, включая концентрации железа свыше 4,5 мг/л, аммонийного азота, превышающие 3,0 мг/л, и перманганатную окисляемость более 5 мгО<sub>2</sub>/л. Такие параметры свидетельствуют о значительной загрязнённости воды и усложняют её эффективную очистку до установленных нормативных требований.

Как видно из рисунка 1, при очистке подземной воды, содержащей примеси сложного состава, с увеличением воздушно-водяного отношения концентрация общего железа в воде снижается. Кроме того, применение сорбента марки АС увеличивает эффективность удаления этого загрязнителя. Однако даже при степени насыщения воды кислородом воздуха 5 к 1 с последующей фильтрацией на фильтрах с использованием сорбента марки АС не было получено в фильтрате устойчивых нормативных концентраций по рассматриваемым примесям. И все же очевидна разница в действии выбранных материалов по отношению к данным загрязнителям.

<sup>1</sup> Научные исследования, разработка технологии и производство адсорбентов и фильтрующих средств для очистки и доочистки воды [Электронный ресурс] // Сорбент АС. – URL: <https://alsis-ur.ru/sorbent-as/> (дата обращения: 25.05.2025).

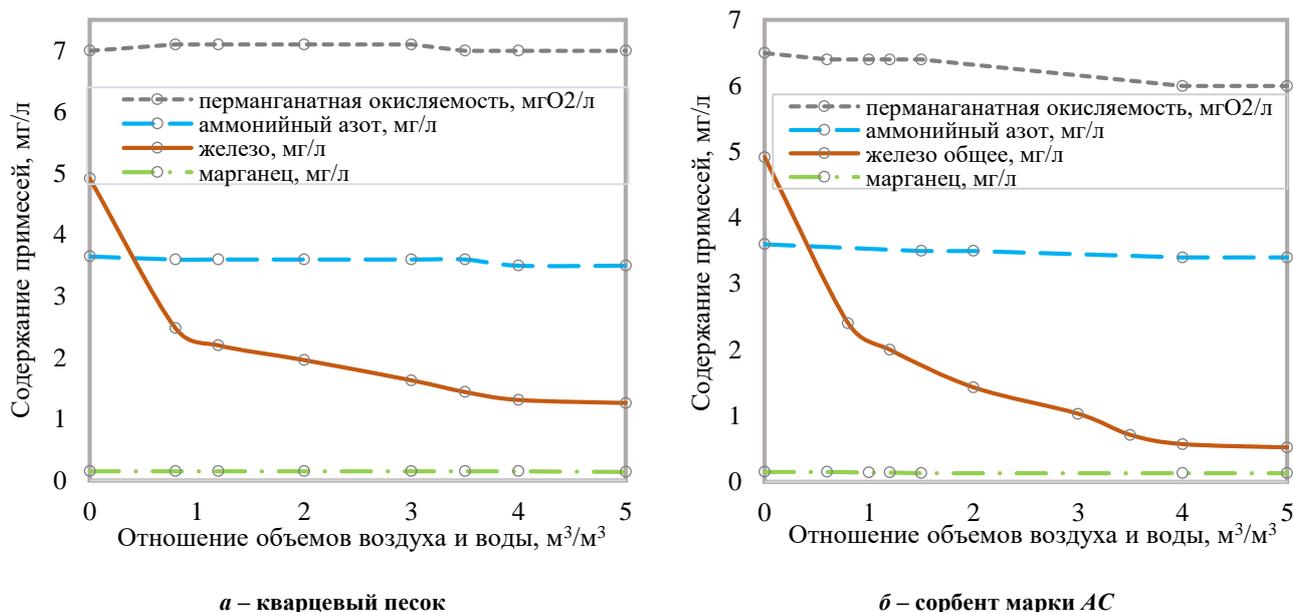


Рисунок 1. – Снижение концентраций загрязняющих веществ на кварцевом песке и сорбенте АС при изменении степени аэрации подземной воды

*Методология исследований.* Наиболее распространенным способом описания адсорбционных явлений являются изотермы адсорбции, которые позволяют установить особенности и механизм адсорбции на основе формы изотерм. В качестве объекта исследования с целью оценки адсорбционных свойств и характеристик пористой структуры были выбраны четыре образца: кварцевый песок (свежий и бывший в эксплуатации) и сорбент АС (свежий и бывший в эксплуатации). Бывшие в эксплуатации адсорбенты взяты из производственных фильтров станций обезжелезивания Витебской области.

Кварцевый песок считается инертным материалом с размером частиц 0,8–1,2 мм и насыпной плотностью 0,68–0,72 г/см<sup>3</sup>. Химический состав песка следующий (в % масс.): SiO<sub>2</sub> – 99,2%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,67%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,075%, MgO – 0,025%, остальное – менее 0,03%<sup>2</sup>. Производителем сорбента марки АС является ООО «АЛСИС», г. Екатеринбург. Данный материал имеет размер частиц 0,7–1,4 мм. Его химический состав: SiO<sub>2</sub> – 78%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 7,0%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 5,0%, MgO – 0,5%, остальное – менее 9,5%<sup>3</sup>.

Определение удельной поверхности и объема пор проводилось путем анализа изотерм адсорбции, полученных с использованием порометра BELSORP MAX, принцип действия которого основан на адсорбции газов и паров на внешней и внутренней поверхностях (в порах) исследуемых образцов. Изотерма адсорбции представляет собой зависимость количества адсорбированного вещества (величины адсорбции) от парциального давления этого вещества в газовой фазе при постоянной температуре. В качестве адсорбтива (вещества, молекулы которого могут адсорбироваться на поверхности адсорбента) применялась вода. Анализ данных был выполнен с использованием аналитического программного обеспечения BELMaster MicrotracBEL Corp<sup>4,5</sup>.

Исследуемые образцы перед проведением измерений подвергались предварительной подготовке и дегазации при температуре 160°C в течение часа под вакуумом с последующей продувкой гелием.

На основании обработки полученных изотерм адсорбции и десорбции с использованием аналитического программного обеспечения были рассчитаны следующие характеристики<sup>6</sup>:

- удельная поверхность по методам Лэнгмюра и БЭТ (Брунауэра, Эммета и Теллера);
- удельный объем пор по методам Лэнгмюра и БЭТ (Брунауэра, Эммета и Теллера);
- средний размер (диаметр, ширина) пор по методу БЭТ.

*Экспериментальная часть.* Полученные с помощью порометра BELSORP MAX изотермы адсорбции/десорбции исследуемых образцов (свежего и бывшего в эксплуатации песка и сорбента марки АС) представлены на рисунке 2.

<sup>2</sup> АкваТрит [Электронный ресурс] / Кварцевый песок и гравий. – URL: <https://aquatreat.by/komplektuyushhie/filtruyushhie-sredy/kvarcevuyj-pesok-i-gravij/> (дата обращения: 25.05.2025).

<sup>3</sup> См. сноску 1.

<sup>4</sup> Высокоточный прибор для измерения адсорбции газа/пара. Руководство по эксплуатации. – MicrotracBEL Corp. BELSORP MAX, 2020 – 180 с.

<sup>5</sup> BELMaster. Analysis Software. User's Manual. – MicrotracBEL Corp., 2020. – 227 p.

<sup>6</sup> См. сноску 5.

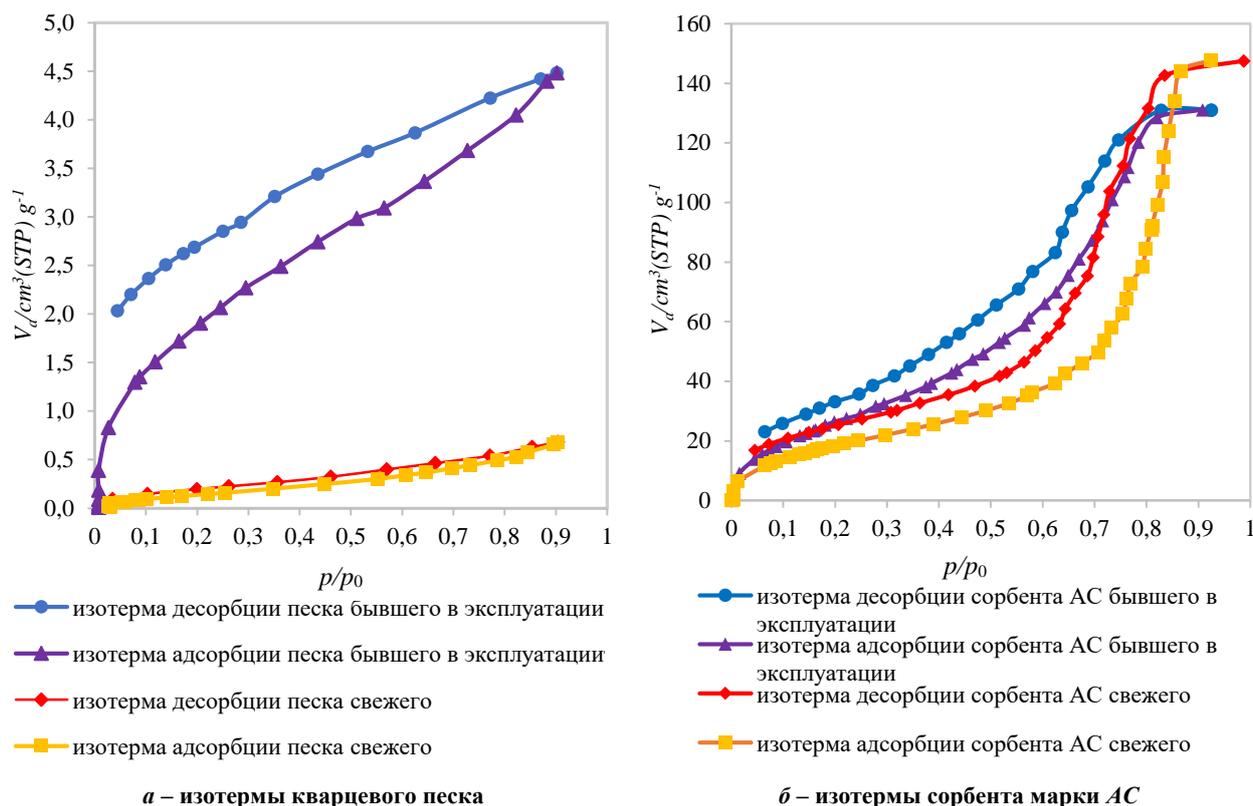


Рисунок 2. – Изотермы адсорбции/десорбции исследуемых образцов на адсорбтиве вода  $H_2O$  ( $p_0 = 2,317$  кПа,  $20^\circ C$ )

Анализ полученных изотерм адсорбции/десорбции (восходящие ветви в области средних и высоких относительных давлений ( $p/p_0 > 0,4$ ) для обоих образцов кварцевого песка (см. рисунок 2, а) позволяет отнести их к типу IV согласно классификации IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry), что характерно для мезопористых материалов (диаметр пор 2–50 нм). Изотермы данного типа отражают протекание процесса капиллярной конденсации в мезопорах и макропорах, а выгнутый характер начального участка указывает на сильное взаимодействие адсорбат-адсорбента. Явление капиллярной конденсации связано с тем, что пары адсорбируемого газа конденсируются в порах твёрдого вещества при давлениях ниже давления насыщенного пара<sup>7</sup>.

Появление петли гистерезиса на изотерме адсорбции-десорбции связано с тем, что заполнение пор и последующая десорбция протекает по разному механизму, в результате чего изотерма десорбции оказывается сдвинутой в область меньших относительных давлений по отношению к изотерме адсорбции. Для свежего песка петля гистерезиса узкая, почти вертикальная в области высоких  $p/p_0$  (0,8–1,0), которая соответствует типу H4. Закрывание петли происходит при  $p/p_0 \approx 0,4$  (эффект капиллярного испарения). Это указывает на наличие щелевидных пор (slit-shaped pores). У песка, взятого из эксплуатируемого фильтра, петля широкая без четкого плато при  $p/p_0 \rightarrow 1$ , с резким спадом десорбционной ветви при  $p/p_0 \approx 0,45$  (H3-тип). Данный вид изотерм характерен для материалов с неоднородной структурой пор (трещины, конические или чернильницеобразные поры). Это объясняется физическим изменением зерен в процессе эксплуатации песка: у свежего песка гистерезис вызван контактными порами между частицами, а у использованного – капиллярной конденсацией в щелевидных порах, образовавшихся при эксплуатации.

Таким образом, расширение гистерезиса является диагностическим признаком необратимых текстурных изменений при эксплуатации фильтрующей загрузки. Формирование пор типа «чернильница» (ink-bottle pores) объясняется механическим разрушением зерен под нагрузкой и химической модификацией поверхности. Вероятно, это происходит из-за накопления оксидов железа на поверхности песка из фильтруемой воды, что приводит к росту мезопористости в использованном песке. Эффект закрытия петли при  $p/p_0 \approx 0,4$  (свежий песок) связан с капиллярным испарением из мезопор критического диаметра (теория Кельвина), тогда как для использованного песка смещение точки закрытия отражает уменьшение среднего диаметра пор (комплексная система широких и узких пор, включая «чернильницы»).

Полученный вид изотерм адсорбции/десорбции для обоих образцов сорбента АС (см. рисунок 2, б) относится по классификации IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) к IV типу и имеет петлю гистерезиса, нижнюю ветвь которой получают, измеряя адсорбцию при последовательном добавлении газа в систему (изотерма адсорбции), а верхнюю ветвь – при последовательном его убавлении (изотерма десорбции). Представленная петля типа H3 для обоих образцов определяется задержкой конденсации и свидетельствует о том, что адсорбент имеет щелевидные поры. Однако для бывшего в эксплуатации сорбента марки АС гистерезисная петля существенно

<sup>7</sup> См. сноску 5.

шире, что указывает на увеличение доли мезопор, появление большего количества «горлышек» в пористой структуре и усиление капиллярной конденсации.

*Результаты и обсуждения.* На основании обработки полученных изотерм адсорбции и десорбции с использованием аналитического программного обеспечения BELMaster MicrotracBEL Corp были рассчитаны показатели исследуемых образцов, представленные в таблице 1.

Таблица 1. – Результаты анализа исследуемых образцов

Показатель	Кварцевый песок		Сорбент АС	
	свежий	бывший в эксплуатации	свежий	бывший в эксплуатации
Удельная поверхность по методу BET, м <sup>2</sup> /г	0,49503	5,5487	57,422	87,735
Суммарный объем пор по методу BET, см <sup>3</sup> /г (при стандартных условиях)	0,1474	1,6522	17,098	26,124
Средний диаметр пор по методу BET, нм	4,45	2,61	8,47	4,82
Коэффициент C (энергетическая константа)	11,44	35	24,829	19,412
Удельная поверхность по методу Ленгмюра, м <sup>2</sup> /г	1,0337	22,002	111,15	129,5
Суммарный объем пор по методу Ленгмюра, см <sup>3</sup> /г (при стандартных условиях)	1,8981	6,5513	33,096	38,561
Коэффициент B	1,8981	0,8145	3,0103	4,5721
Энергия адсорбции по методу Дубинина-Астахова (DA), кДж/моль [5]	1,4348	5,0491	5,1495	5,3821

Результаты анализа кварцевого песка показывают (см. таблицу 1) значительные различия между свежим и бывшим в эксплуатации материалом. Удельная поверхность по методу BET для свежего песка составила 0,495 м<sup>2</sup>/г, что свидетельствует о низкой пористости данного материала. В то же время, у бывшего в эксплуатации песка этот показатель увеличился до 5,549 м<sup>2</sup>/г, что указывает на развитие пористой структуры при фильтрации. Это подтверждается и увеличением суммарного объема пор с 0,1474 до 1,6522 см<sup>3</sup>/г.

Средний диаметр пор (метод BET) снизился с 4,45 нм до 2,61 нм, что может быть связано с образованием более мелких пор в процессе использования материала. Коэффициент C вырос с 11,44 до 35, что отражает увеличение энергии адсорбционного взаимодействия в бывшем в эксплуатации песке и изменение потенциала адсорбции.

Дополнительно были получены показатели по методу Ленгмюра: удельная поверхность для свежего песка равна 1,03 м<sup>2</sup>/г при суммарном объеме пор 1,898 см<sup>3</sup>/г; у бывшего в эксплуатации песка – 22,00 м<sup>2</sup>/г и 6,55 см<sup>3</sup>/г соответственно. Коэффициент B снизился с 1,898 до 0,8145 при переходе к использованному материалу. Энергия адсорбции по методу DA увеличилась с 1,43 кДж/моль у свежего до 5,05 кДж/моль у бывшего в эксплуатации образца.

Данные показатели свидетельствуют о существенных изменениях структурных характеристик кварцевого песка после эксплуатации: увеличение удельной поверхности и объема пор говорит о развитии микропористой неоднородной структуры за счет возможных дефектов или разрушений поверхности. Рост энергии адсорбции у бывшего в эксплуатации песка может быть обусловлен изменениями поверхностных свойств и наличием новых адсорбционных центров. С данными значениями согласуется рост гистерезиса и смещение точки закрытия петли на рисунке 3.

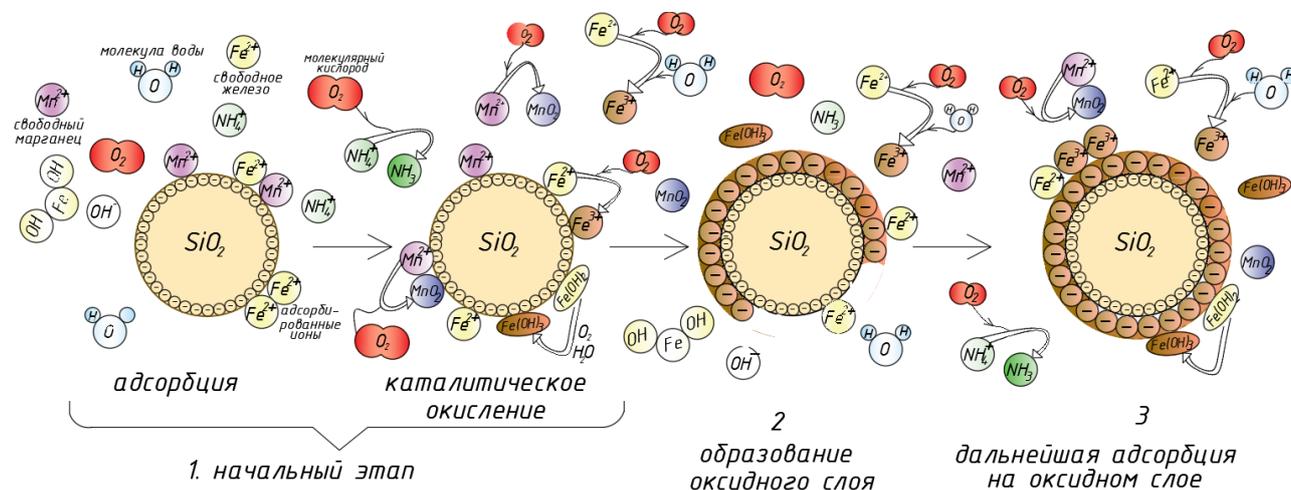


Рисунок 3. – Гидрохимическая модель процессов удаления железа и марганца на кварцевом песке в напорном скором фильтре

Таким образом, результаты подтверждают значительную трансформацию структурных и энергетических параметров кварцевого песка в процессе его использования. Эти результаты могут быть полезны для описания гидрохимической модели процессов обезжелезивания в ходе эксплуатации фильтров с песчаной загрузкой.

Анализ полученных результатов и теоретическое изучение вопросов обезжелезивания на фильтрах с песчаной загрузкой<sup>8</sup> [6; 7] позволяет получить гидрохимическую модель процессов удаления железа и марганца на песчаной загрузке (см. рисунок 3).

1. Начальный этап (фаза свежего песка) включает:

– адсорбцию железа  $Fe^{2+}$  и молекулярного кислорода  $O_2$  на поверхности зерен песчаной загрузки. Вначале процесса обезжелезивания адсорбция осуществляется под действием поверхностных Ван-дер-Вальсовых сил притяжения или сил притяжения Кулона (физическая адсорбция), возникающих вследствие противоположного заряда адсорбата и адсорбента [8] (см. рисунок 3). Стоит отметить, что с увеличением содержания кислорода сорбционная способность песка, зерна которого имеют слабоотрицательный заряженный электрокинетический потенциал, увеличивается по отношению к положительно заряженным ионам двухвалентного железа.

– каталитическое окисление адсорбированных ионов железа и их гидролиз на поверхности загрузки фильтра с образованием гидроксида железа. Дальнейшая сорбция ионов железа (II) протекает одновременно на оставшейся еще свободной поверхности зерен песка и на поверхности гидроксида железа.

2. Через некоторое время происходит сорбция окисленного железа, а электрокинетический потенциал зерен среды уменьшается, адсорбционные свойства указанной поверхности снижаются. Последующее каталитическое окисление сорбированного железа и марганца в присутствии растворенного в воде кислорода приводит к образованию нового оксидного слоя (адсорбционно-каталитической пленки). Осевшие на поверхности зерен гранулы соединений железа постепенно сливаются в крупные скопления и покрывают всю загрузку. Вначале лишь часть мицелл железа (II) претерпевает окисление до железа (III), однако по мере прохождения новых порций исходной воды процесс окисления распространяется на всё железо внутри загрузки, которое при данных условиях способно окисляться. Как показали лабораторные исследования<sup>9</sup> [7], данный слой в начальных стадиях образования состоит из аморфных гидроксидов железа ( $Fe(OH)_3$ ) с возможным присутствием других оксидов двухвалентного и трехвалентного железа ( $FeO$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Fe_3O_4$ ,  $Fe(OH)_2$  и др.), но со временем и при длительном контакте с воздухом эти гидроксиды кристаллизуются в более стабильные формы гематита ( $Fe_2O_3 \cdot xH_2O$ ) или лейкоксенита ( $FeO(OH)$ ).

3. Оксидный слой (продукт, образованный в результате сорбции, гидролиза и окисления ионов двухвалентного железа) обладает значительно большей сорбционной способностью, чем поверхность свежей загрузки, кроме того, у него высокая величина удельной поверхности, а также он характеризуется наличием больших количеств связанной воды, что делает ее эффективным адсорбентом губчатой структуры [6]. На данный факт указывают полученные изотермы (см. рисунок 3) и результаты анализа исследуемых образцов (см. таблицу 1). Увеличение энергии адсорбционного взаимодействия по отношению ионов железа (II) в бывшем в эксплуатации песке и изменение потенциала адсорбции согласуется с ростом коэффициента  $C$  (см. таблицу 1). На данном этапе извлечение из воды ионов железа (II) и марганца (II) достигается адсорбцией на оставшейся свободной поверхности зерен кварцевого песка и на поверхности оксидного слоя.

4. Образовавшийся слой интенсифицирует процессы дальнейшей адсорбции и окисления железа (II) и марганца (II) и облегчает процесс очистки.

Для свежего сорбента марки  $AC$  анализ результатов исследований (см. таблицу 1) текстурных (пористых) характеристик (метод  $BET$ ) показывает, что его удельная поверхность составляет  $57,422 \text{ м}^2/\text{г}$ , в то время как у бывшего в эксплуатации адсорбента этот показатель выше на  $52,8\% - 87,735 \text{ м}^2/\text{г}$ . Это свидетельствует о том, что бывший в эксплуатации сорбент обладает более развитой поверхностью, что связано с изменениями в его структуре.

Суммарный объем пор бывшего в эксплуатации сорбента увеличился с  $17,098$  до  $26,124 \text{ см}^3/\text{г}$  ( $+52,9\%$ ), что согласуется с ростом удельной поверхности и указывает на более выраженную пористую структуру материала. Это может способствовать улучшению его адсорбционных свойств.

Средний диаметр пор у свежего сорбента составляет  $8,47 \text{ нм}$ , что указывает на то, что свежий сорбент марки  $AC$  состоит в основном из мезопор, в то время как у бывшего в эксплуатации сорбента он значительно меньше –  $4,82 \text{ нм}$ . Это уменьшение диаметра пор может быть связано с процессами засорения или изменениями в морфологии материала во время его эксплуатации.

Энергия адсорбции (метод Дубинина-Астахова,  $DA$ ) незначительно возросла с  $5,1495$  до  $5,3821 \text{ кДж/моль}$  ( $+4,5\%$ ), что обеспечивает более сильное взаимодействие с молекулами адсорбатов.

Понижение значения коэффициента  $C$  с  $24,829$  до  $19,412$  ( $-21,8\%$ ) указывает на снижение энергии взаимодействия между адсорбатом и адсорбентом, что отражает снижение энергии адсорбционного взаимодействия поверхности с адсорбатом из-за изменения химического состава поверхности бывшего в эксплуатации сорбента (например, накопления полярных групп).

По данным метода Ленгмюра удельная поверхность свежего сорбента составляет  $111,15 \text{ м}^2/\text{г}$ , а у бывшего в эксплуатации –  $129,5 \text{ м}^2/\text{г}$ , что на  $16,5\%$  выше. Это подтверждает тенденцию к увеличению адсорбирующей способности отработанного материала. Суммарный объем пор по методу Ленгмюра для свежего сорбента увеличился с  $33,096 \text{ см}^3/\text{г}$  до  $38,561 \text{ см}^3/\text{г}$ , что также подтверждает более высокую пористость последнего образца.

<sup>8</sup> Saleh A. Biologisk avskiljning av järn och mangan vid dricksvattenproduktion: Civilingenjör, teknisk kemi: 12.00.15. – 2021. – 48 с. URL: <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:miun:diva-41495>.

<sup>9</sup> См. сноску 4.

Коэффициент  $B$  вырос с 3,0103 до 4,5721 (+51,9%), что указывает на более высокую степень насыщения активных центров на поверхности бывшего в эксплуатации сорбента.

Полученные результаты подтверждают предположение о том, что в процессе эксплуатации структура и функциональность сорбента марки  $AC$  изменяются. Это важно учитывать при исследовании механизмов очистки природной воды и разработке гидрохимической модели процессов удаления загрязняющих веществ.

Процесс обработки воды на сорбенте марки  $AC$  состоит из следующих этапов (рисунок 4).

1. Начальный этап (фаза свежего сорбента) включает:

– адсорбцию. Хотя алюмосиликатные материалы обладают большей поверхностью и более высокой адсорбционной способностью, чем кварцевый песок, в начале процесса адсорбция железа и марганца осуществляется аналогично под действием поверхностных Ван-дер-Ваальсовых сил притяжения или сил притяжения Кулона (физическая адсорбция), возникающих вследствие противоположного заряда адсорбата и адсорбента. Введение же кислорода воздуха в фильтр с сорбентом марки  $AC$  интенсифицирует процесс адсорбции на поверхности материала благодаря его свойствам, которые играют ключевую роль в окислении растворённых форм железа ( $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ ) и марганца ( $Mn^{2+} \rightarrow Mn^{4+}$ ) в сравнении с кварцевым песком;

– каталитическое окисление. Алюмосиликаты служат катализаторами для окисления металлов в растворе, стимулируя и увеличивая скорость реакции окисления за счёт активации кислорода, находящегося в воде. Окисленные железо и марганец осаждаются на поверхности сорбента, что дополнительно увеличивает эффективность их удаления. Каталитически активные компоненты входят в структуру гранулы сорбента равномерно, что обеспечивает его эффективную работу даже при разломе гранулы.

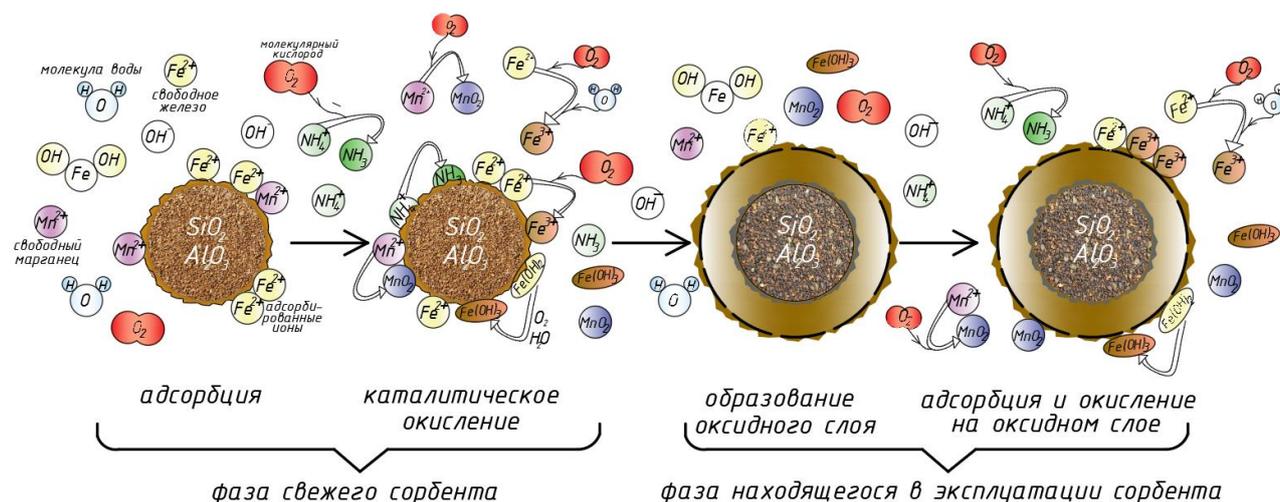


Рисунок 4. – Гидрохимическая модель процессов удаления железа и марганца на сорбенте  $AC$  в скором фильтре

2. Второй этап (фаза работающего сорбента  $AC$ ) включает:

– образование оксидного слоя. По мере продолжения работы фильтра свежий сорбент, как было описано выше, начинает терять свои адсорбирующие свойства из-за насыщения его активных центров соединениями ( $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ ,  $Mn^{2+} \rightarrow Mn^{4+}$ ), вследствие чего формируются барьеры и изменения в структуре этого материала. Можно предположить, что в мезопорах и макропорах свежего сорбента марки  $AC$  происходит осаждение оксидов двухвалентного и трехвалентного железа  $FeO$ ,  $Fe(OH)_2$ ,  $Fe_2O_3$ , марганца  $MnO_2$  и магнетита  $Fe_3O_4$ , образовавшихся в результате аэрации и обезжелезивания [6], что приводит к увеличению удельной поверхности. Полученные данные объясняют возможное повышение адсорбционной емкости бывшего в эксплуатации сорбента для малых молекул из-за уменьшения размера пор;

– адсорбцию и окисление оксидного слоя. В дальнейшем соединения железа и марганца адсорбируются слабее, но окисление ионов  $Fe^{2+}$  может ускоряться за счёт накопленных на поверхности его оксидов (стадия автокатализа). Насыщение активных центров сорбента также значительно уменьшает ионообменную ёмкость материала по отношению к ионам аммония  $NH_4^+$ . Незначительное снижение аммония происходит за счёт его перехода в газообразное состояние  $NH_3$ , который вымывается из обрабатываемой воды. Поэтому очистка от аммонийных соединений малоэффективна.

3. Последняя фаза для данных материалов называется фазой регенерации отработанного песка и сорбента марки  $AC$ . Дальнейшее обезжелезивание воды на песке и сорбенте марки  $AC$  сопровождается, с одной стороны, деградацией образовавшегося оксидного слоя за счёт снижения адгезионных сил между примесями и поверхностью зерен фильтрующего материала, что приводит к отделению и выносу частиц железа (III) из фильтра и ухудшению качества получаемого фильтрата, а с другой стороны, увеличением потерь напора за счёт значительного количества воды, содержащейся в рыхлых и нестабильных его агрегатах. Таким образом, при сложном составе

микропримесей, содержащихся в воде, межпоровое пространство достаточно быстро засоряется железистыми и марганцевыми соединениями. В связи с этим необходимо проводить регенерацию данных материалов, например, обратной промывкой чистой водой. Время между промывками (фильтроцикл) должен устанавливаться при эксплуатации фильтров до максимальной величины роста потерь напора, но для обезжелезивания воды чаще по ухудшению качества фильтрата.

**Заключение.** Полученные результаты подтверждают гипотезу о структурной модификации кварцевого песка и сорбента марки АС в процессе эксплуатации, что открывает перспективы для его использования после регенерации.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод о том, что бывшие в эксплуатации кварцевый песок и сорбент марки АС демонстрируют улучшенные характеристики по сравнению со свежими образцами во многих аспектах. Увеличенная удельная поверхность и суммарный объем пор свидетельствуют об их высокой адсорбирующей способности и развитой микропористой структуре. Однако уменьшение среднего диаметра пор может указывать на изменения в механизмах взаимодействия между адсорбатом и адсорбентом после эксплуатации.

Изучение свойств фильтрующих материалов и составление гидрохимической модели поведения загрязняющих веществ в процессах очистки воды указывают на доказанную ранее эффективную очистку от железа и марганца. Однако данные виды материалов не способны дать положительный результат по обработке воды с несколькими примесями в больших концентрациях, присутствующими в природной воде, преимущественно органического и аммонийного происхождения. Поэтому очевидно предположить, что данные фильтрующие материалы нужно рассматривать в качестве первой ступени очистки природной воды сложного состава, что является предпосылкой для изучения возможных альтернативных фильтрующих загрузок и изменения технологических схем, например, применяя двухступенчатое фильтрование.

Данные результаты подчеркивают важность изучения свойств фильтрующих материалов с целью их использования в процессах водоподготовки и разработки эффективных методов регенерации адсорбентов для повышения их эксплуатационных характеристик в области очистки природных вод.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Велюго Е.С. Анализ фильтрующих материалов для обработки подземных вод сложного состава // Устойчивое развитие: региональные аспекты: сб. ст. XI Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых / г. Брест (24–26 апр. 2019 г.). – С. 211–213. URL: <https://rep.bstu.by/discoverBasheer>.
2. Yushchenko V., Velyugo E., Romanovski V. Influence of ammonium nitrogen on the treatment efficiency of underground water at iron removal stations // *Groundwater for Sustainable Development*. – 2023. – Vol. 22. DOI: 10.1016/j.gsd.2023.100943.
3. Ющенко В.Д., Велюго Е.С., Козицин Т.В. Влияние степени аэрации воды на удаление марганца при обработке воды сложного состава в напорных фильтрах с различными нагрузками // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Приклад. науки*. – 2024. – № 4(39). – С. 58–62. DOI: 10.52928/2070-1683-2024-39-4-58-62.
4. Велюго Е.С. Влияние аммонийного азота на состав и очистку подземных вод // Актуальные вопросы эффективного и комплексного использования водных ресурсов: сб. материалов междунар. науч.-практ. конф., приуроченной ко Всемирному дню водных ресурсов / г. Минск (22–24 марта 2023 г.) / М-во природ. ресурсов и охраны окружающей среды, РУП «ЦНИИКИВР»; отв. ред. О.В. Ковзунова. – Минск: Нац. библ. Беларуси, 2023. – С. 96–100.
5. Дубинин М.М. Адсорбция и пористость. – М.: ВАНХЗ, 1972. – 128 с.
6. Николадзе Г.И. Обезжелезивание природных и оборотных вод. – М.: Стройиздат, 1978. – 161 с.
7. Sharma S., Petrusevskioch B., Schippers J.C. Biological iron removal from groundwater: a review // *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*. – 2005. – № 54(4). – С. 239–247. DOI: 10.2166/aqua.2005.0022.
8. Лукнер Л., Шестаков В.М. Моделирование миграции подземных вод. – М.: Недра, 1986. – 208 с.

#### REFERENCES

1. Velyugo, E.S. Analysis of filtrate materials for processing complex underground waters // *Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference of Young Scientists «Sustainable Development: Regional Aspects»*. – Brest, 2019. – P. 211–213. URL: <https://rep.bstu.by/discoverBasheer>.
2. Yushchenko, V. Influence of ammonium nitrogen on the treatment efficiency of underground water at iron removal stations / V. Yushchenko, E. Velyugo, V. Romanovski // *Groundwater for Sustainable Development*. – 2023. DOI: 10.1016/j.gsd.2023.100943.
3. Effect of water aerating rates on manganese removal during processing of complex water in pressure filters with various loads / V.D. Yushchenko, E.S. Velyugo, T.V. Kozitsin // *Bulletin of Polotsk State University. Series F. Construction. Application sciences*. – 2024. – № 4(39). – P. 58–62. DOI: 10.52928/2070-1683-2024-39-4-58-62.
4. Velyugo, E.S. Influence of ammonium nitrate on the composition and purification of underground waters / E.S. Velyugo // *Collection of materials from the international scientific-practical conference «Current issues of effective and comprehensive use of water resources»*, dedicated to the global daily water resources, March 22–24, 2023, Minsk. – Ministry of Natural Resources and Environmental Protection, RUP «TsNIIKIVR»; [edited by O. V. Kovzunova]. – Minsk: National Library of Belarus, 2023. – P. 96–100.
5. Dubinin, M.M. *Adsorption and resistance* / M.M. Dubinin. – M.: VAKhZ, 1972. – 128 p.
6. Nikoladze, G.I. *Reduction of natural and recycled waters* / G.I. Nikoladze. – M.: Stroiizdat, 1978. – 161 p.
7. Sharma, S. Biological iron removal from groundwater: a review / S. Sharma, B. Petrusevskioch, J.C. Schippers // *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*. – 2005. – № 54(4). – P. 239–247. DOI: 10.2166/aqua.2005.0022.
8. Lukner, L. *Modeling of underground water migrations* / L. Lukner, V.M. Shestakov – M.: Nedra, 1986. – 208 p.

Поступила 11.06.2025

**HYDROCHEMICAL MODELS OF IRON AND MANGANESE REMOVAL  
ON QUARTZ SAND AND SORBENT AC**

**E. VELYUGO, A. YERMAK, V. YUSHCHENKO**  
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

*The article describes a comparative analysis of the structural and energy parameters of fresh and used sand and AC grade sorbent by the water vapor adsorption method using a BELSORP MAX porometer. The processing of adsorption-desorption isotherms was performed in the BELMaster MicrotracBEL Corp software package with the calculation of the specific surface area, total volume, average pore size and adsorption energy of water vapor using the BET, Langmuir and Dubinin-Astakhov (DA) methods. An increase in the specific surface area and porosity of the used sand and sorbent of the AC brand is observed, which indicates structural changes during their operation: an increase in the specific surface area and porosity. The obtained results allow us to draw a conclusion about the possibility of reusing spent sand and AC grade sorbent after regeneration, as well as the need to take into account changes in their properties when designing treatment systems.*

**Keywords:** *natural waters, water quality, sand loading, AC sorbent, hydrochemical model, porometer.*

УДК 69.05:331.45

DOI 10.52928/2070-1683-2025-41-2-31-35

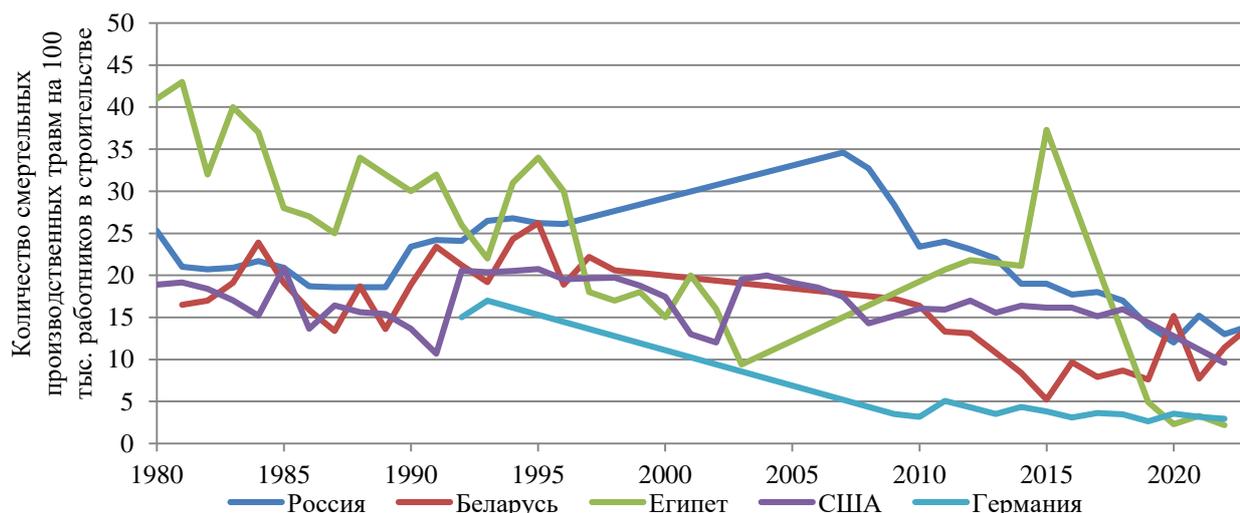
**ПОДГОТОВКА И ОБУЧЕНИЕ РАБОТНИКОВ КАК ЭЛЕМЕНТ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В АРАБСКОЙ РЕСПУБЛИКЕ ЕГИПЕТ****С.Г. КОЖАРСКИЙ<sup>1)</sup>, О.В. КАПУСТИНА<sup>2)</sup>, канд. техн. наук, доц. Ю.А. БУЛАВКА<sup>3)</sup>**<sup>1)</sup> Филиал АО «НИКИМТ-Атомстрой», Египет,<sup>2)</sup> АО «НИКИМТ-Атомстрой», Москва,<sup>3)</sup> Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)<sup>3)</sup> ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5025-7419>

В настоящей статье выполнен анализ уровня смертельного производственного травматизма работников в строительных отраслях ряда стран, определены недопустимые уровни риска гибели в строительстве. Обоснована необходимость совершенствования процесса подготовки и обучения работников безопасному выполнению работ на высоте. На примере процедуры подбора и подготовки кадрового состава для выполнения работ на площадке строительства АЭС «Эль-Дабаа» в Арабской Республике Египет показаны варианты совершенствования процесса подготовки и обучения работников безопасному выполнению работ на высоте с целью снижения уровня производственного травматизма.

**Ключевые слова:** строительство, атомная электростанция, работа на высоте, травматизм, обучение.

**Введение.** Одной из наиболее важных отраслей мировой экономики, в которой задействовано более 100 миллионов человек, является строительство. На данную отрасль приходится около 10% мирового ВВП, вместе с тем она характеризуется высокой травмоопасностью [1]. Из более 330 тыс. летальных исходов от несчастных случаев на производстве, ежегодно регистрируемых в мире, около 20% всех смертельных случаев травматизма на рабочих местах приходится именно на строительную отрасль. Каждый день в мире на строительных площадках погибает около 200 работников и еще 1600 получают тяжелые травмы, как правило, приводящие к потере трудоспособности. К наиболее травмоопасным видам работ в строительной отрасли относят работы на высоте, работы с кранами и подъемными механизмами, земляные работы и работы с электрооборудованием [1]. Наибольшая доля производственных травм в строительстве регистрируется при выполнении работ на высоте – более 25% от общего количества травм в отрасли [2; 3]. Травмы, связанные с падениями с высоты, занимают первое место в мире по общему числу пострадавших и второе по числу смертельных случаев [4–6].

На рисунке 1 приведена динамика изменения коэффициента смертельного производственного травматизма на 100 тыс. работников в строительных отраслях ряда стран за период с 1980–2023 гг., составленная на основе данных статических баз Международной организации труда.



**Рисунок 1.** – Динамика изменения коэффициента смертельного производственного травматизма на 100 тыс. работников в строительных отраслях ряда стран за период с 1980–2023 гг.

Анализ усредненного показателя за рассматриваемый период наблюдения показал, что наиболее высокая вероятность гибели в строительных отраслях Арабской Республики Египет –  $2,4 \cdot 10^{-5}$ , чуть ниже в Российской Федерации –  $2,1 \cdot 10^{-5}$ , в США и Республике Беларусь по  $1,6 \cdot 10^{-5}$ , вместе с тем в ряде европейских стран подобные уровни риска являются недопустимыми. К примеру, в Нидерландах парламентом в качестве государствен-

ного закона, исходя из экономических и социальных возможностей страны, установлена приемлемая обществом вероятность смерти в течение года для граждан от опасностей, связанных с работой, на уровне менее  $10^{-6}$ . Данное обстоятельство обуславливает необходимость разработки специализированных программ по профилактике травматизма в строительстве и, в частности, при выполнении работ на высоте.

Частую именно организационные причины, связанные с упущениями при подборе и подготовке кадрового состава, приводят к нарушениям работниками требований правил по охране труда при работе на высоте и, как следствие, производственной травме. В связи с этим процесс подготовки и обучения работников безопасному выполнению работ на высоте требует совершенствования, что определило цель настоящего исследования.

**Основная часть.** Госкорпорация «Росатом» в качестве своих ключевых ценностных приоритетов выделяет «безопасность», «эффективность», «ответственность за результат», «уважение», «единую команду», «на шаг впереди» [7]. Особое место отведено обеспечению безопасности, которая признана ключевой ценностью и приоритетным стратегическим направлением деятельности, интегрированной во все без исключения процессы корпорации. Безопасность является критическим фактором в нормах и поведении каждого работника и представляет собой центральный аспект корпоративной культуры Росатома – культуру безопасности<sup>1,2,3</sup> [7; 8; 9]. При строительстве атомных электростанций значительное внимание уделяется подготовке, обучению и повышению квалификации работников и специалистов в области охраны труда, что является важным элементом обеспечения безопасности при производстве работ [8]. В 2019 году Госкорпорация «Росатом» получила сертификат партнерства с концепцией «Vision Zero» (Нулевого травматизма) Международной ассоциации социального обеспечения, запущенной в Сингапуре 4 сентября 2017 года на XXI Всемирном конгрессе по безопасности и гигиене труда. Фундаментом концепции являются семь «золотых правил», приведенных на рисунке 2, которые содержат базовые принципы охраны труда и безопасности на рабочем месте, одним которых является постоянное повышение квалификации – развитие компетентности [10].



Рисунок 2. – Семь «золотых правил» концепции «Vision Zero»

<sup>1</sup> НП-001-97 (ПНАЭ Г-01-011-97). Общие положения обеспечения безопасности атомных станций ОПБ-88/97: утв. постановлением Госатомнадзора России от 14.11. 1997 г. № 9. – М., 1998. – С. 18.

<sup>2</sup> Культура безопасности: доклад Международной консультативной группы по ядерной безопасности INSAG // Атомная энергия. – 1991. – Т. 71(4). – С. 358–376.

<sup>3</sup> Единая отраслевая политика культуры безопасности Госкорпорации «Росатом» и ее организаций: утв. приказом Госкорпорации «Росатом» от 19.07.2021 № 1/884-П.

Объектом данного исследования является процесс подготовки и обучения работников на площадке строительства АЭС «Эль-Дабаа» в Арабской Республике Египет. Для исключения ошибочных действий персонала, приводящих к несчастным случаям, выстроена система входного контроля кандидатов на трудоустройство в Филиале «НИКИМТ-Атомстрой» – граждан Арабской Республики Египет – на базе моделей управленческих компетенций, принятых в Госкорпорации «Росатом».

Входной контроль предусматривает оценку практических и теоретических знаний и навыков у соискателей для производства работ на площадке строительства АЭС «Эль-Дабаа». Элементы входного контроля потенциального сотрудника включают:

- 1) оценку соответствия соискателя действующим требованиям в организации;
- 2) перечень теоретических вопросов;
- 3) перечень практических заданий;
- 4) анализ критериев оценки соискателей.

Значительное внимание уделяется корректному выполнению практических заданий соискателями для анализа общей технической грамотности и наличия необходимых практических навыков. В практическом блоке при проведении входного контроля потенциальных сотрудников предусмотрен ряд этапов: на 1-м этапе требуется выполнить 5 заданий, у граждан Арабской Республики Египет проверяются навыки чтения, письма и наличия элементарных знаний безопасного производства работ на строительной площадке по заявленной специальности; ко 2-му этапу практических испытаний допускаются соискатели, успешно прошедшие 1-й этап и претендующие на подтверждение от 3-го разряда и выше по заявленной специальности. Соискателям предоставляются необходимые материалы, оборудование и инструменты, а также разъясняется устное или письменное задание. После окончания работы соискатели должны предъявить результат выполнения практического задания, убрать рабочие места, сдать инструменты и корректно завершить все предусмотренные заданием задачи.

Результаты выполнения теоретических и практических заданий рассматриваются и оцениваются членами специальной комиссии. Соискатели, успешно прошедшие входной контроль, направляются для трудоустройства в Филиал «НИКИМТ-Атомстрой». Для новых работников до производства работ и допуска к самостоятельной работе с учетом специфики строительства создана комплексная программа обучения, целью которой является развитие профессиональных компетенций работников и доведение до них требований нормативно-правовых актов Арабской Республики Египет и локальных нормативных актов Филиала «НИКИМТ-Атомстрой», регламентирующих вопросы охраны труда, а именно: изучение безопасных методов и приемов выполнения работ при воздействии вредных и (или) опасных производственных факторов, снижение травматизма при работе на высоте путем повышения профессиональных компетенций в рамках имеющейся квалификации, освоение практических навыков работы на высоте (работа на высоте в ограниченных замкнутых пространствах, формирование навыков использования самостраховки, использования анкерных линий с системой ползункового типа, перемещения по строительной площадке, работа с лесов и площадок), изучение основных требований пожарной безопасности; качественное изменение профессиональных компетенций, необходимых навыков по оказанию первой помощи в случае возникновения неотложной ситуации, для того чтобы облегчить боль, снизить серьезность последствий травм и увеличить шансы на выживание.

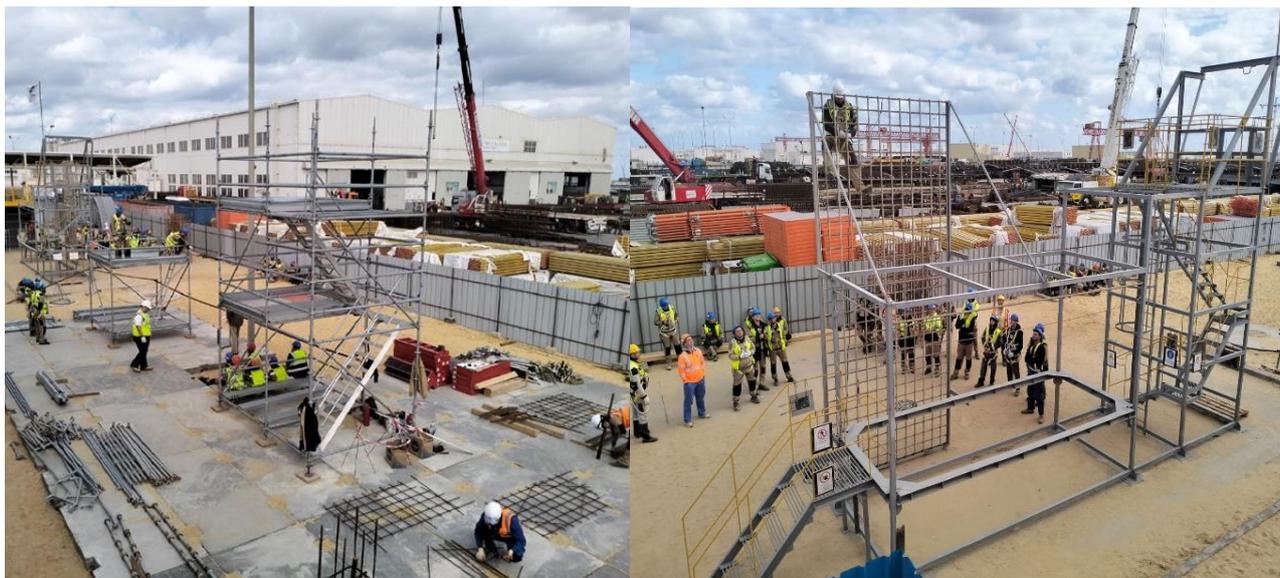
Учебно-тематический план данной программы обучения состоит из 40 часов. Он выстроен по модульному принципу и содержит 7 модулей теоретического и практического обучения. Модули 1, 2, 4, 5, 6, 7 – общие для всех категорий персонала. Модуль 3 – для персонала, выполняющего соответствующие виды работ.

В связи с тем, что ведущим опасным производственным фактором при проведении строительно-монтажных работ на площадке строительства является риск падения с высоты, программа обучения предусматривает детальное рассмотрение вопросов работы на высоте с практической отработкой данных навыков на специально сконструированных тренажерах (примеры некоторых из них приведены на рисунке 3) и практические занятия по формированию умений и навыков безопасного выполнения работ. На тренажерах для практической отработки навыков работы на высоте на площадке строительства реализованы различные сценарии, приближенные к реальным условиям работы на высоте, с возможностью использования современного оборудования и средств защиты.

Примерный перечень упражнений для практических занятий включает:

- 1) задание правильно надеть страховочную привязь и отрегулировать перед использованием;
- 2) передвижение с использованием гибкой анкерной линии, имеющей промежуточные крепления;
- 3) работы на высоте с применением стационарных лестниц доступа;
- 4) обеспечение безопасности при перемещении по конструкциям и высотным объектам;
- 5) перемещение по конструкции с использованием системы безопасности с фактором падения, равным нулю;
- 6) спуск и подъем по вертикальной лестнице и конструкции с использованием средств защиты втягивающего типа (блокирующих устройств инерционного типа) и стационарных анкерных линий;
- 7) работы на горизонтальной открытой площадке с использованием стационарных горизонтальных анкерных линий;
- 8) анализ основных ошибок: отсутствие карабина на груди, перекося при затягивании поясного ремня, неправильное положение компонентов привязи, нарушение принципа непрерывной страховки;
- 9) выполнение приемов и последовательности алгоритма «5 шагов безопасности»;
- 10) эвакуация пострадавшего с высоты.

Заканчивается процесс обучения проверкой знания работника с оформлением протокола и последующим допуском к самостоятельной работе на площадке строительства АЭС «Эль-Дабаа» в Арабской Республике Египет.



**Рисунок 3. – Тренажеры для практической отработки навыков работы на высоте на площадке строительства АЭС Филиалом «НИКИМТ-Атомстрой»**

**Заключение.** Выполненный анализ уровня смертельного производственного травматизма работников в строительной отрасли подтвердил, что в настоящее время она является одной из наиболее травмоопасных. Определены недопустимые уровни риска гибели в строительстве в ряде стран, в частности, в Арабской Республике Египет. Обоснована необходимость совершенствования процесса подготовки и обучения работников безопасному выполнению работ на высоте. На примере процедуры подбора и подготовки кадрового состава для выполнения работ на площадке строительства АЭС «Эль-Дабаа» в Арабской Республике Египет показаны варианты совершенствования процесса подготовки и обучения работников безопасному выполнению работ на высоте с целью снижения уровня производственного травматизма.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ смертельного травматизма в строительной отрасли Российской Федерации и ряде других зарубежных стран / Н.В. Матюшева, В.М. Худякова, С.А. Войнаш и др. // Инженер. вестн. Дона. – 2024. – № 9(117). – С. 129–145.
2. Карауш С.А., Сенченко В.А. Внедрение новых организационных мер безопасности при работе на высоте в строительстве // Вестн. Том. гос. архитектур.-строит. ун-та. – 2015. – № 4(51). – С. 186–191.
3. Сенченко В.А., Пушенко С.Л., Стасева Е.В. Концепция технических мер безопасности при выполнении высотных работ на крышах зданий в условиях арктического севера // Вестн. Волгоград. гос. архитектур.-строит. ун-та. Сер. Стр-во и архитектура. – 2018. – № 51(70). – С. 178–185.
4. Антонов М.В. Мировая статистика по причинам падений с высоты // Информационные технологии (IT) в контроле, управлении качеством и безопасности: сб. науч. тр. VIII Междунар. конф. школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее» / г. Томск (7–12 окт. 2019 г.). – Томск: ТПУ, 2019. – С. 23–27.
5. Совершенствование страховочных систем при проведении работ на высоте / Н.Х. Абдрахманов, З.А. Закирова, Г.М. Шарфутдинова и др. // Нефтегазовое дело. – 2024. – № 3. – С. 31–52. DOI: 10.17122/ogbus-2024-3-31-52.
6. Козырицкий П.А. Анализ травматизма и несчастных случаев при производстве работ на высоте // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2010. – № 2(27). – С. 170–178.
7. Руденко В.А., Василенко Н.П. Культура безопасности в системе ценностей госкорпорации «РОСАТОМ» // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – № 1(18). – С. 118–122.
8. Кожарский С.Г., Капустина О.В., Булавка Ю.А. Формирование культуры безопасности при строительстве атомной электростанции в Арабской Республике Египет // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. F, Стр-во. Приклад. науки. – 2024. – № 2(37). С. 31–35. DOI: 10.52928/2070-1683-2024-37-2-31-35.
9. Mathematical modeling and evaluation of the safety culture for the operating nuclear power plants in China: Critical review and multi-criteria decision analysis / Yi-Jing Zhang, Zhi-Rong Huang, Fu-Yun Zhao et al. // Annals of Nuclear Energy. – 2022. – Vol. 168. DOI: 10.1016/j.anucene.2021.108871.
10. Усикова О.В., Майданкина Д.К. Анализ реализации концепции Vision Zero на территории Российской Федерации // Экономика труда. – 2020. – Т. 7, № 12. – С. 1323–1336. DOI: 10.18334/et.7.12.111353.

#### REFERENCES

1. Analysis of fatal injuries in the construction industry of the Russian Federation and a number of other foreign countries / N.V. Matyusheva, V.M. Khudyakova, S.A. Voynash, L.S. Sabitov // *Engineering Bulletin of the Don*. – 2024. – № 9(117). – P. 129–145.
2. Implementation of new organizational safety measures when working at height in construction / S.A. Karaush, V.A. Senchenko // *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. – 2015. – № 4(51). – P. 186–191.

3. The concept of technical safety measures when performing high-altitude work on the roofs of buildings in the Arctic North / V.A. Senchenko, S.L. Pushchenko, E.V. Staseva // *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series Construction and Architecture*. – 2018. – № 51(70). – P. 178–185.
4. World statistics on the causes of falls from a height / M.V. Antonov // *Information technologies (IT) in control, quality management and safety: collection of scientific papers of the VIII International Conference of schoolchildren, students, graduate students, young scientists «Resource-efficient systems in management and control: a look into the future»*, October 7–12, 2019, Tomsk. – Tomsk: TPU, 2019. – P. 23–27.
5. Improving safety systems when working at height / N.Kh. Abdrakhmanov, Z.A. Zakirova, G.M. Sharafutdinova, M.Yu. Kochergin, R.A. Sultanova, Yu.A. Denisova, A.K. Navanova // *Online publication «Oil and Gas Business»*. – 2024. – № 3. – P. 31–52. DOI: 10.17122/ogbus-2024-3-31-52.
6. Analysis of injuries and accidents during work at height / P.A. Kozyritsky // *Bulletin of the Belarusian-Russian University*. – 2010. – № 2(27). – P. 170–178.
7. Rudenko, V.A. & Vasilenko, N.P. (2016). Kul'tura bezopasnosti v sisteme tsennosti goskorporatsii «ROSATOM» [Safety Culture in Value System of ROSATOM State Corporation]. *Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Security]*, 1(18), 118–122. (In Russ., abstr. in Engl.).
8. Formation of a safety culture during the construction of a nuclear power plant in the Arab Republic of Egypt / S.G. Kozharsky, O.V. Kapustina, Yu.A. Bulavka // *Bulletin of Polotsk State University. Series F, Construction. Applied sciences*. – 2024. – № 2(37). – P. 31–35. DOI: 10.52928/2070-1683-2024-37-2-31-35.
9. Mathematical modeling and evaluation of the safety culture for the operating nuclear power plants in China: Critical review and multi-criteria decision analysis / Yi-Jing Zhang, Zhi-Rong Huang, Fu-Yun Zhao and others // *Annals of Nuclear Energy*. – 2022. – Vol. 168. DOI: 10.1016/j.anucene.2021.108871.
10. Usikova O.V., Maydankina D.K. (2020). Analiz realizatsii kontseptsii Vision Zero na territorii Rossiyskoy Federatsii [Analysis of the Vision Zero concept implementation in the Russian Federation]. *Ekonomika truda*, 7(12), 1323–1336. DOI: 10.18334/et.7.12.111353.

Поступила 26.03.2025

#### TRAINING AND WORKER TRAINING AS AN ELEMENT OF SAFETY DURING THE CONSTRUCTION OF A NUCLEAR POWER PLANT IN THE ARAB REPUBLIC OF EGYPT

S. KOZHARSKIY<sup>1)</sup>, O. KAPUSTINA<sup>2)</sup>, Y. BULAUKA<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> The ARE Branch Office of NIKIMT-Atomstroy JSC, Egypt,

<sup>2)</sup> NIKIMT-Atomstroy JSC, Moscow,

<sup>3)</sup> Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

*This article analyzes the level of fatal industrial injuries of workers in the construction industries of a number of countries, and identifies unacceptable levels of risk of death in construction. It substantiates the need to improve the process of training and education of workers in the safe performance of work at height. Using the example of the procedure for selecting and training personnel to perform work at the El Dabaa NPP construction site in the Arab Republic of Egypt, options for improving the process of training and education of workers in the safe performance of work at height in order to reduce the level of industrial injuries are shown.*

**Keywords:** construction, nuclear power plant, work at height, injuries, training.

УДК 628.5:621.311.22

DOI 10.52928/2070-1683-2025-41-2-36-41

## ИЗВЕСТЬ НА ОСНОВЕ ШЛАМА ВОДООЧИСТКИ ТЭС

канд. техн. наук, доц. А.А. МЕЖЕНЦЕВ, канд. техн. наук, доц. Г.А. БУРАК  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Проведен дериватографический анализ шлама водоподготовки в температурном интервале 25–1000°C. На основании полученных данных изучены кинетики образования свободного CaO при прокаливании образцов сухого высокодисперсного шлама при температурах 800–1000°C и шлама, спрессованного в виде таблеток. Для определения температуры взаимодействия CaO с различными добавками были смодифицированы соответствующие смеси с добавками AlOOH и SiO<sub>2</sub>. Показано, что разложение высокодисперсных частиц шлама (CaCO<sub>3</sub>) и взаимодействие их с оксидами, придающими гидравлические свойства извести (AlOOH и SiO<sub>2</sub>), может осуществляться при температуре 1000°C. Были изготовлены образцы балок и определены их прочностные показатели. Рентгеноструктурный анализ образцов показал наличие CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO·2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и 2CaO·SiO<sub>2</sub>. В результате проведенных исследований получена слабогидравлическая известь, с использованием шлама ХВО, что позволяет утилизировать отход и одновременно улучшить экологическую обстановку в Республике Беларусь.

**Ключевые слова:** шлам ХВО, дериватограммы, рентгенограммы, оксид кальция, термообработка, гидравлическая известь.

**Введение.** На тепловых электростанциях вода проходит 2 стадии обработки: предварительную и ионитную. Предочистка проводится методами осаждения: коагуляцией, известкованием и магниальным обескремниванием. При известковании в воду добавляют известковое молоко, которое переводит растворимые бикарбонаты кальция и магния в нерастворимые карбонаты. Затем воду обрабатывают FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O (или Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>·18H<sub>2</sub>O, или FeSO<sub>4</sub>), который, являясь коагулянтом, осаждает все взвеси и примеси в виде коллоидной массы. В процессе коагуляции двухвалентное железо окисляется и образует гидроксид железа (III), на поверхности которого адсорбируются коллоидные примеси воды. В результате сорбции гидроксидом железа (III) коллоидных частиц примесей воды формируются хлопья. Укрупнившиеся хлопья оседают под действием силы тяжести, увлекая за собой взвешенные частицы. Шлам, содержащий 97–99% влаги, обезвоживают. Химический состав шлама (%): SiO<sub>2</sub> – 0–4,9; Fe(OH)<sub>3</sub> – 5,8–7,1; CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O – 3–9,5; CaCO<sub>3</sub> – 62,8–68,2; CaSO<sub>4</sub> – 3,9–6,6; органические вещества – 5,2–8,9. Фазовый состав шлама: органика – 10%, Fe(OH)<sub>3</sub> – 10%, CaCO<sub>3</sub> – 70%, SiO<sub>2</sub> – 2%, Ca(OH)<sub>2</sub> + Fe(OH)<sub>2</sub> – 3%, CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O – 3%.

Ежегодно образуется до 7 тыс. тонн таких шламов, проблема утилизации которых стоит сегодня особенно остро. Химический состав шлама позволяет его утилизировать при производстве строительных материалов [1].

Положительные результаты наблюдались при получении композиционного гипсового вяжущего из строительного гипса, тонкомолотого кварцевого песка (до 20%) и шлама ХВО (до 15%). При этом не изменяются сроки схватывания, нормальная плотность и не снижаются прочностные показатели, но значительно меньше энергоемкость, т.к. не требуется высокотемпературная обработка смеси [2].

Шлам содержит в своем составе до 10% CaSO<sub>4</sub> и его можно использовать для производства гипса, если нейтрализовать раствором серной кислоты и получить сульфат кальция.



Гипс производится в автоклавах при T = 139°, P = 0,25 МПа, τ = 2,0–2,5 часа [3].

Другим вяжущим, при производстве которого используется большое количество карбонатного компонента (до 75%), является порландцемент, получаемый обжигом при температуре 1450°C. Для интенсификации процесса клинкерообразования в цементную смесь вводится до 1% шлама нейтрализации, что позволяет снизить температуру обжига до 1380°C. Снижение температуры обжига происходит за счет образования эвтектических расплавов при более низких температурах за счет содержания фтора в шламе, который является активным минерализатором [4].

Как видно из фазового состава, основным компонентом шламов является карбонат кальция и его можно использовать для получения воздушной извести.

**Основная часть.** Предварительно был проведен дериватографический анализ сухого высокодисперсного шлама ХВП ТЭС в температурном интервале 25–1000°C (рисунок 1).

Из полученной дериватограммы следует, что пик при 71–78°C, по-видимому, соответствует удалению воды, количество которой не превышает 1% от массы исследуемого образца. Обратный пик с максимумом в районе 300–312°C соответствует разложению органических компонентов шлама, количество которых составляет порядка 5%. При температуре 753–758°C наблюдается основной максимум потери массы образца, связанный с разложением CaCO<sub>3</sub>, и потеря массы образца составляет 24%.

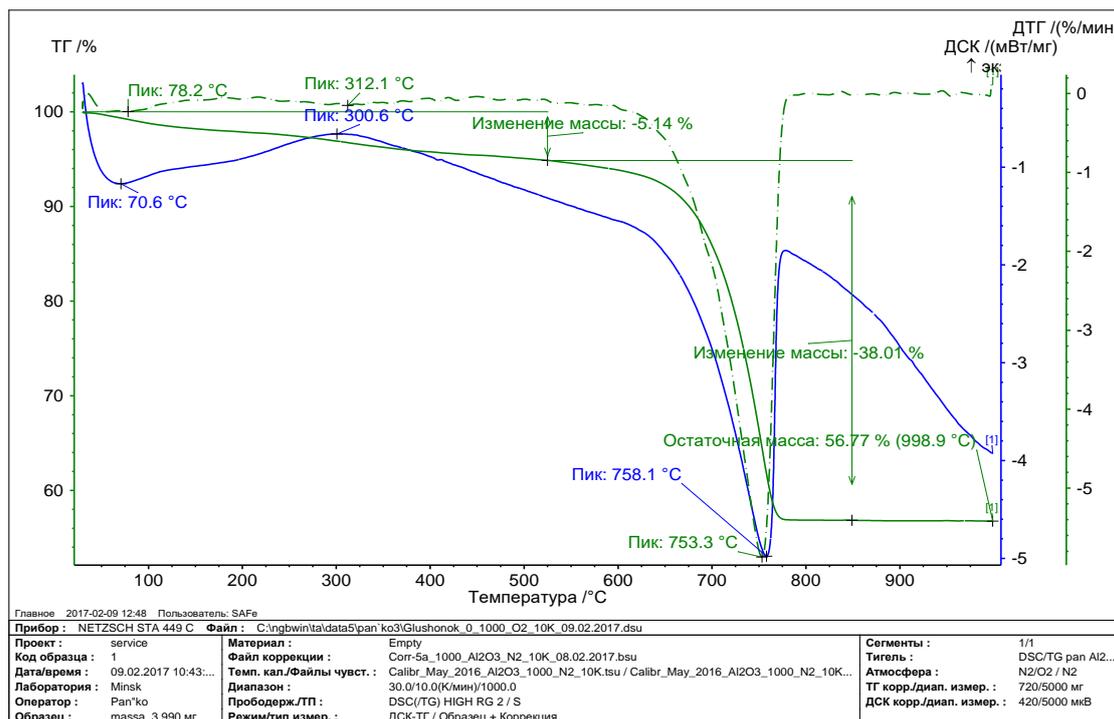


Рисунок 1. – Дериватограмма высокодисперсного шлама ХВО ТЭС

На основании этих данных изучены кинетики образования свободного СаО при прокаливании образцов сухого высокодисперсного шлама при температурах 800°C (кривая 1), 900°C (2), 1000°C (3), образцов мела при температурах 800°C (4) и 900°C (5) и шлама, спрессованного в виде таблеток, которые представлены на рисунке 2.

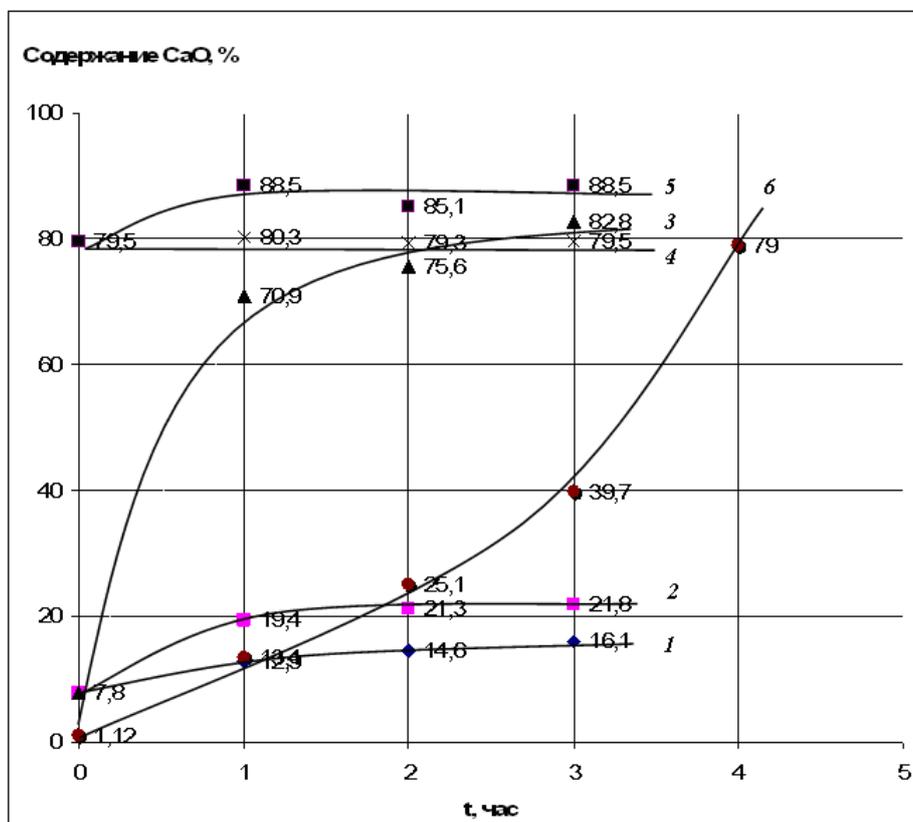


Рисунок 2. – Кинетика изменения содержания СаО для образцов высокодисперсного шлама ХВО ТЭС и образцов мела при различных температурах (высокодисперсный шлам ХВО ТЭС: 1–800°C (кривая 1), 900°C (2), 1000°C (3); образцы мела при температурах 800°C (4) и 900°C (5); шлам, спрессованный в виде таблеток при 800°C (6))

Из этих данных следует, что разложение дисперсных образцов не реализуется в соответствии с полученной на рисунке 1 дериватограммой, а протекает при более высоких температурах. Как следует из кривой 3 рисунка 2, при 1000°C уже через 1 час образуется 71% CaO, что, по-видимому, связано с низкой теплоёмкостью высокодисперсных образцов шлама. Это подтверждается кривой 6 на рисунке 2, полученной для образцов шлама, спрессованных в виде таблеток, когда выход CaO достигает 71% через 4 часа при 800°C.

Для определения температуры взаимодействия оксида кальция с добавками были смодифицированы смеси шлама с добавками AlOOH и SiO<sub>2</sub>.

Сравнение результатов дифференциального термического анализа (ДТА) разложения образцов шлама без добавок (см. образец 1, рисунок 1) и шлама в присутствии AlOOH (образец 2, рисунок 3) и SiO<sub>2</sub> (образец 3, рисунок 4) не показывает существенных различий в наблюдаемых картинах, кроме появления пика при 500°C на рисунке 3. Молярное отношение компоненты шлам : добавка в образцах с AlOOH (см. рисунок 3) и SiO<sub>2</sub> (см. рисунок 4) составляло 1:1. Для всех образцов фиксируется эндотермический процесс разложения CaCO<sub>3</sub> с максимумом при температурах 758°C (см. рисунок 1), 742°C (см. рисунок 3) и 732°C (см. рисунок 4), а пик с максимумом при 500–510°C, по-видимому, соответствует дегидротации бемита по реакции

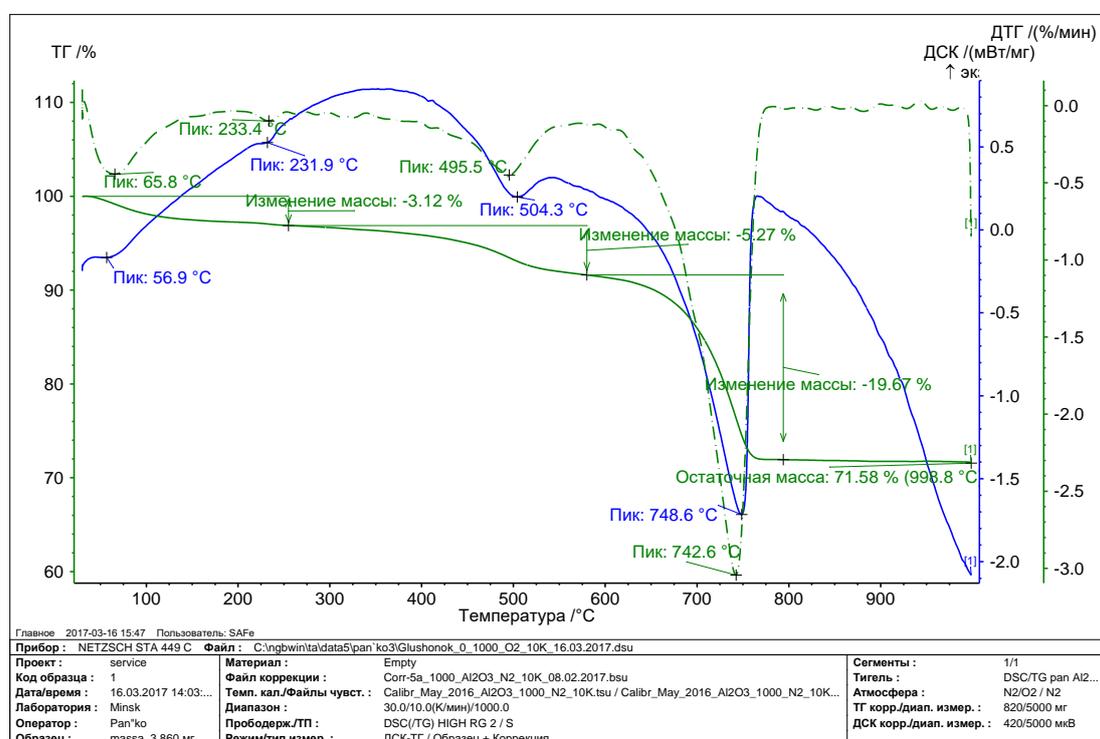


Рисунок 3. – Дериватограмма смеси высокодисперсного шлама ХВО ТЭС с порошком бемита (AlOOH)

Были проведены рентгеноструктурные исследования исходных образцов (1), (2) и (3) и образцов (1), (2), (3), прогретых при 1000°C 2 часа. Исходный шлам идентифицируется на рентгенограмме в виде CaCO<sub>3</sub> в кристаллической модификации кальцит. Рентгенограмма шлама, прогретого при 1000°C 2 часа, не содержит сигналов кальцита, а заменяется рентгенограммой с сигналами от CaO в кристаллической модификации лайм. В исходных образцах (2) и (3) идентифицируются CaCO<sub>3</sub> (кальцит) и AlOOH (бемит) для (2) и CaCO<sub>3</sub> и SiO<sub>2</sub> (кварц) для (3), а в образцах, прогретых при температуре 1000°C 2 часа, наблюдается образование CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и CaO·2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> для (2) и 2CaO·SiO<sub>2</sub> для (3).

Таким образом, показано, что разложение высокодисперсных частиц шлама (CaCO<sub>3</sub>) и взаимодействие их с оксидами, придающими гидравлические свойства извести (AlOOH и SiO<sub>2</sub>), может осуществляться при температуре в 1000°C.

Исходя из полученных данных по рентгеноструктурному анализу для получения гидравлической извести, был приготовлен образец состава CaCO<sub>3</sub> + AlOOH (1:1 в молярном соотношении) путем прогрева при 1000°C в течение 2 часов. Из полученного материала были сформированы таблетки из шлама и алюмината, кварцевого песка и алюмината, гранитной пыли и алюмината и изучено их водопоглощение в течение 40 суток.

Количество присоединенной воды за 40 суток составляет в среднем 5–8%, и из этого следует, что образуются гидросиликаты, гидроалюминаты и гидроферриты. То есть полученная гидравлическая известь является слабо-гидравлической.

В связи с таким результатом были получены два образца А и В следующего состава: образец А (шлам + AlOOH + кварцевый песок, молярное отношение 1:1:1) и образец В (шлам + AlOOH + трепел (аморфизирован-

ный SiO<sub>2</sub>), молярное отношение 1:1:1), прогретые 3 часа при 1000°C. Для этих образцов исходного материала были зарегистрированы кривые ДТА, представленные на рисунках 5 и 6, из которых видно, что пики при ~500°C соответствуют удалению воды из бемита и разложению CaCO<sub>3</sub>.

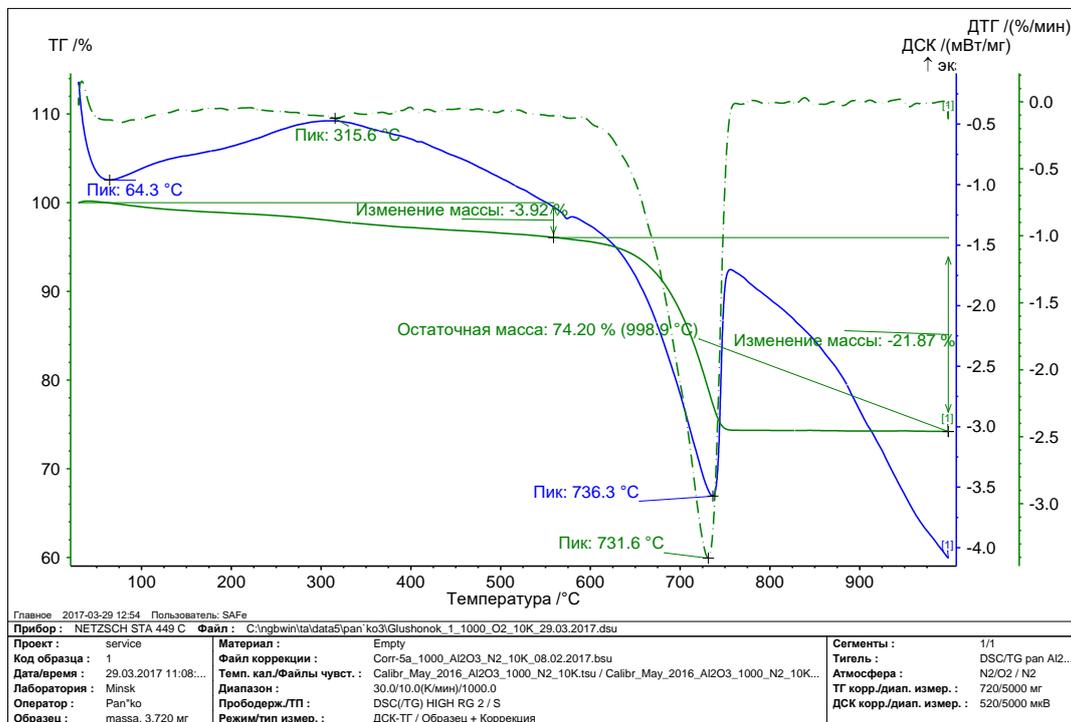


Рисунок 4. – Дериватограмма смеси высокодисперсного шлама ХВО ТЭС с порошком тонкоизмельченного кварца (SiO<sub>2</sub>)

Дериватограммы образцов, содержащих полный набор оксидов: образец А (шлам + AlOOH + кварцевый песок, молярное отношение 1:1:1), представлены на рисунках 5 и 6.

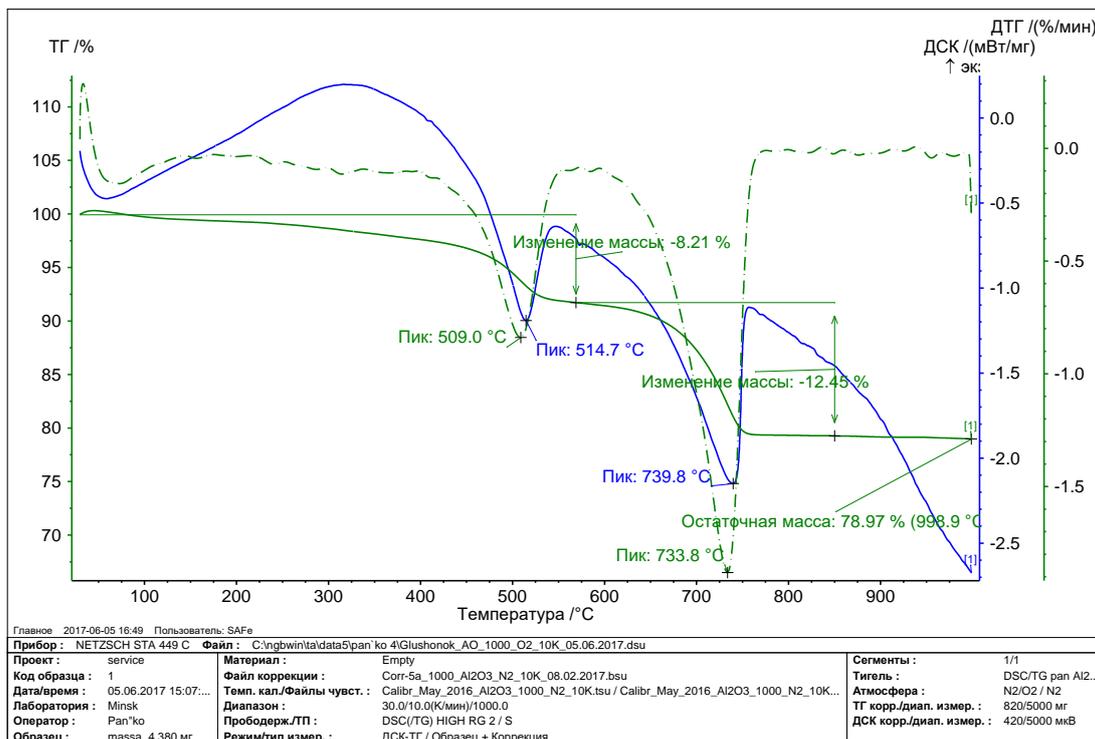


Рисунок 5. – Дериватограмма смеси высокодисперсного шлама ХВО ТЭС с порошком тонкоизмельченного кварца (SiO<sub>2</sub>) и бемита (AlOOH) (образец А)

Рентгеноструктурный анализ образцов А и В (3 часа 1000°C) показал, что для образца А основной кристаллической фазой является кварц и частично присутствует  $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ . В случае образца В основной фазой является  $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  и кварц.

Из гидравлической извести А и В были изготовлены балочки 160×40×40 мм с гранитной пылью в качестве наполнителя (2:1 по массе гранитная пыль: гидравлическая известь, полученная из А и В). Балочки, с применением образцов А, легко деформировались, аналогичные образцы В показали  $R_{\text{изгиб}} = 0,7$  МПа и  $R_{\text{сжат.}} = 3,0$  МПа.

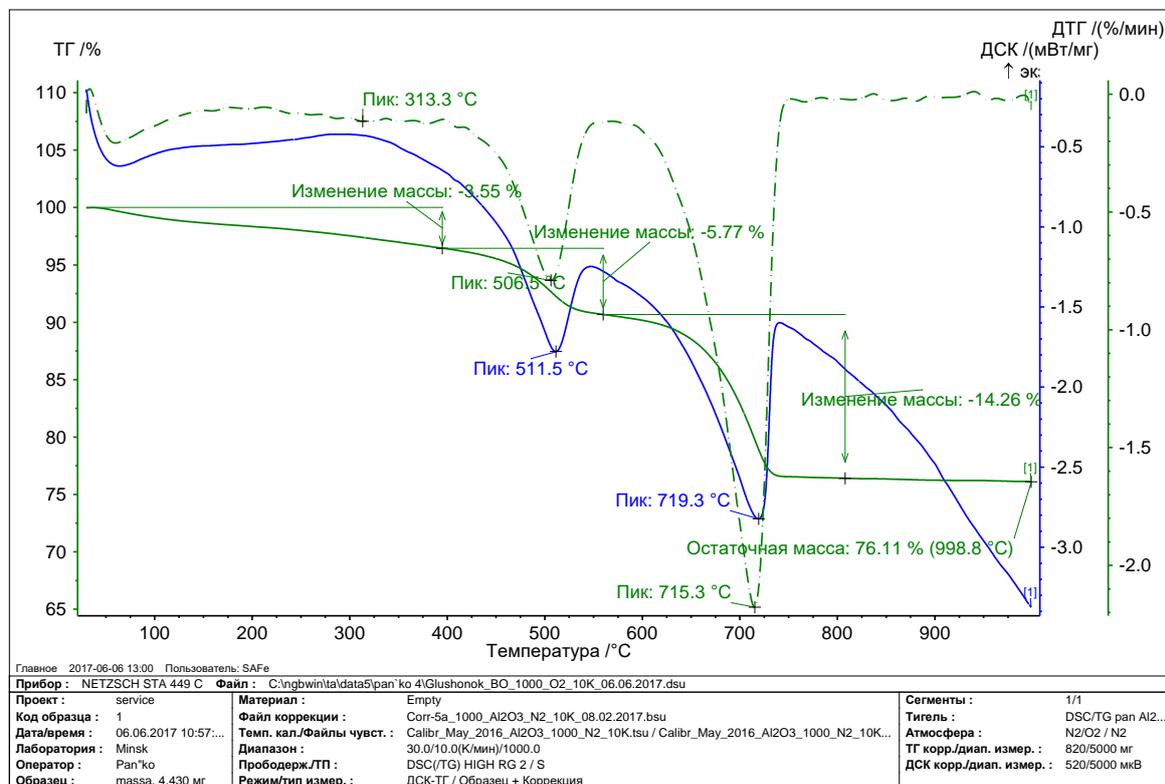


Рисунок 6. – Дериватограмма смеси высокодисперсного шлама ХВО ТЭС с порошком измельченного трепела (аморфизированный  $\text{SiO}_2$ ) и бемита ( $\text{AlOOH}$ )

**Закключение.** Из полученных экспериментальных данных можно сделать вывод, что одним из перспективных направлений является использование шлама ХВО в строительной индустрии. Шлам химводоподготовки ТЭС может быть рекомендован в качестве сырья для производства извести, так как содержит в большом количестве  $\text{CaCO}_3$  – 62,8–68,2%. Изучены кинетики образования свободного  $\text{CaO}$  при прокаливании образцов сухого высокодисперсного шлама при температурах 800–1000°C. Для определения температуры взаимодействия оксида кальция с добавками были смодифицированы смеси шлама с добавками  $\text{AlOOH}$  и  $\text{SiO}_2$ , и установлено, что разложение высокодисперсных частиц шлама ( $\text{CaCO}_3$ ) и взаимодействие их с оксидами, придающими гидравлические свойства извести ( $\text{AlOOH}$  и  $\text{SiO}_2$ ), может осуществляться при температуре 1000°C. Рентгеноструктурный анализ образцов показал наличие  $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ . Полученную гидравлическую известь можно использовать для приготовления штукатурных и кладочных растворов, предназначенных для сухой и влажной среды, бетонов низких марок. Утилизация шлама ХВО ТЭС осуществляется рационально и проводится по энерго-сберегающей, малоотходной технологии, что отвечает геоэкологическим аспектам использования природного и техногенного сырья.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Николаева Л.А., Бородай Е.Н. Ресурсосберегающая технология утилизации шлама водоподготовки на ТЭС. – Казань.: КГЭУ, 2012. – 110 с.
2. Валеев Р.Ш. Утилизация шламовых отходов водоочистки в строительной композиции с использованием минерального наполнителя вяжущего // Вестн. технол. ун-та. – 2015. – Т. 18, № 20. – С. 278–280.
3. Болотова П.А., Качина В.Ю. Рациональные способы водоподготовки и утилизации шламов ВПУ // Новые материалы и технологии их обработки: сб. науч. работ XVIII Республиканской студенческой науч.-техн. конф. / г. Минск (19–20 апреля 2017 г.). – Минск: БНТУ, 2017. – С. 217–218.
4. Войтов И.В., Анкуда М.К., Кузьменков М.И. Применение техногенных продуктов в целях энергосбережения при производстве портландцементного клинкера // Цемент и его применение. – 2022 май-июнь. – С. 56–58.

## REFERENCES

1. Nikolaeva L.A., Boroday E.N. *Resource-saving technology for recycling sludge from water treatment at thermal power plants* // Monograph. – Kazan: KSPEU, 2012. – 110 p.
2. Valeev R.Sh. Utilization of sludge waste from water treatment in a building composition using a mineral binder filler // *Bulletin of the Technological University*. – 2015. – Т. 18, № 20. – P. 278–280.
3. Bolotova P.A., Kachina V.Yu. Rational methods of water treatment and disposal of water treatment sludge // *Novye materialy i tekhnologii ikh obrabotki: sb. nauch. rabot XVIII Respublikanskoi studencheskoi nauch.-tekhn. konf. / g. Minsk (19–20 aprelya 2017 g.)*. – Minsk: BNTU, 2017. – P. 217–218.
4. I.V. Voitov, M.K. Ankuda, M.I. Kuzmenkov. Application of man-made products for energy saving purposes in the production of Portland cement clinker // *Cement and its application*. – May-June 2022. – P. 56–58.

Поступила 18.06.2025

**LIME BASED ON TPP WATER TREATMENT SLUDGE**

**A. MEZHENTSEV, G. BURAK**  
(Belarusian National Technical University, Minsk)

*A derivatographic analysis of water treatment sludge was carried out in the temperature range of 25–1000°C. Based on the data obtained, the kinetics of the formation of free CaO during calcination of samples of dry highly dispersed sludge at temperatures of 800–1000°C and sludge pressed in the form of tablets was studied. To determine the temperature of interaction of CaO with various additives, the corresponding mixtures with AlOOH and SiO<sub>2</sub> additives were modified. It was shown that the decomposition of fine particles of sludge (CaCO<sub>3</sub>) and their interaction with oxides that impart the hydraulic properties of lime (AlOOH and SiO<sub>2</sub>) can be carried out at a temperature of 1000°C. Samples of beams were made and their strength properties were determined. X-ray diffraction analysis of the samples showed the presence of CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO·2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and 2CaO·SiO<sub>2</sub>. As a result of the research, weakly hydraulic lime was obtained using chemical waste sludge, which makes it possible to dispose of waste and at the same time improve the environmental situation in the Republic of Belarus.*

**Keywords:** CW sludge, derivatograms, X-ray diffraction patterns, calcium oxide, heat treatment, hydraulic lime.

УДК 699.841

DOI 10.52928/2070-1683-2025-41-2-42-47

## ТЕПЛООБРАЗОВАНИЕ В ЭНЕРГОПОГЛОЩАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТАХ СДВИГОВОГО ТИПА

**Е.А. МОЙСЕЙЧИК, Ш.А. ЭШОНХУЖАЕВА**  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)  
*mit\_fk@bntu.by*

На основании анализа литературных источников показано, что стальные энергопоглотители, использующие активные элементы в упругопластической и пластической стадиях работы, могут быть применены для защиты массивных мостовых сооружений. В статье предложены места расположения упругопластических стальных энергопоглотителей в пролетных мостовых конструкциях и показана их энергетическая эффективность. Экспериментально, с использованием лабораторных образцов из малоуглеродистой пластичной стали доказано, что в окрестности конструктивно-технологических дефектов (отверстия, вырезы) в растянутых и сдвигаемых элементах конструкций ЭП происходит локализация деформаций, особенно при упруго-пластической и пластической стадиях работы стали, с повышением средней температуры поверхности стали при деформировании на несколько десятков градусов (до 90°C), что позволяет в режиме мониторинга по температурному полю активного элемента контролировать работоспособность элементов стальных пролетных сооружений мостов и энергопоглотителей.

**Ключевые слова:** сейсмостойкость, энергопоглотители, деформации сдвига, энергоёмкость, теплообразование.

**Введение.** Территория Узбекистана подвержена воздействию разрушительных землетрясений, которые происходили как в глубокой древности, так и относительно недавно [1]. Землетрясения интенсивностью более 7 баллов приводили к заметным нарушениям работоспособности искусственных сооружений на железных и автомобильных дорогах. Особенно это проявляется для массивных конструкций, на элементы которых действуют большие инерционные силы при сейсмических воздействиях. Повреждения опор, железобетонных и сталежелезобетонных балок мостов возникают, в основном, в опорных и пролетных строениях и проявляются в трещинообразовании, смещениях, осадках и разрушении опор; разрушении опорных частей пролетных строений; смещении и падении пролетных строений; разрушении соединительных элементов и др. [2–4]. Повышения устойчивости положения пролетных строений мостовых конструкций при землетрясениях достигают устройством различных ограничителей перемещений вдоль и поперек осей сооружения, специальных антисейсмических устройств, не допускающих раскрытия деформационных швов и др. [2–4]. Снижения названных повреждений можно достичь установкой демпфирующих устройств в сопряжениях между опорами мостов и пролетными балками. Демпферы поглощают энергию сейсмических ударов, снижают передающиеся на пролетные конструкции сейсмические ускорения [5–7]. Такие энергопоглощающие устройства разработаны для сооружений различной массы<sup>1</sup>. Сейсмопоглотители, активные элементы которых выполнены из пластичной стали, используют работу материала в упругопластической и пластической стадии и надежно обеспечивают работоспособность массивных зданий и сооружений (многоэтажные жилые и производственные здания, различные сооружения)<sup>2</sup>. Энергопоглощающие элементы в зданиях и сооружениях в каждом полцикле колебаний преобразуют механическую энергию землетрясения, передающуюся на строительные конструкции, в другие виды энергии (в основном, тепловую) и предотвращают разрушения основных несущих конструкций при возможных пиковых перегрузках во время землетрясений. Поглощенная энергия преобразуется в тепловую и отводится в окружающую среду. Температура стальных активных элементов, преобразующих механическую энергию в тепловую, достигает 120–150°C<sup>3,4</sup>. Энергопоглотители этого типа могут быть применены для защиты массивных мостовых сооружений.

В настоящей статье рассмотрим схемы применения упругопластических стальных энергопоглотителей в пролетных мостовых конструкциях и их энергетическую эффективность.

**Основная часть. Сведения об упругопластических энергопоглотителях.** Энергопоглотители (далее – ЭП) классифицируются исходя из физических принципов работы сейсмозащиты сооружений, конструктивных особенностей поглотителей сейсмической энергии, материала и стадии его деформирования, сопряжения энергопоглотителей с защищаемым сооружением и др. [5–7]. В качестве активных поглотителей энергии используются демпферы различных принципов действия, адаптивные системы, системы с гасителями колебаний, сейсмические экраны, завесы и др.

<sup>1</sup> Строительные нормы. Пособие по расчету и конструированию стальных сейсмостойких каркасов многоэтажных зданий в развитии СНиП РК 2.03-04-2001. Ч. 2. – Приняты и введены в действие МИТ РК от 03.11.2004 г. № 426 с 1 марта 2005 г. – Алматы: Ин-т Проектстальконструкция, 2005. – 52 с.

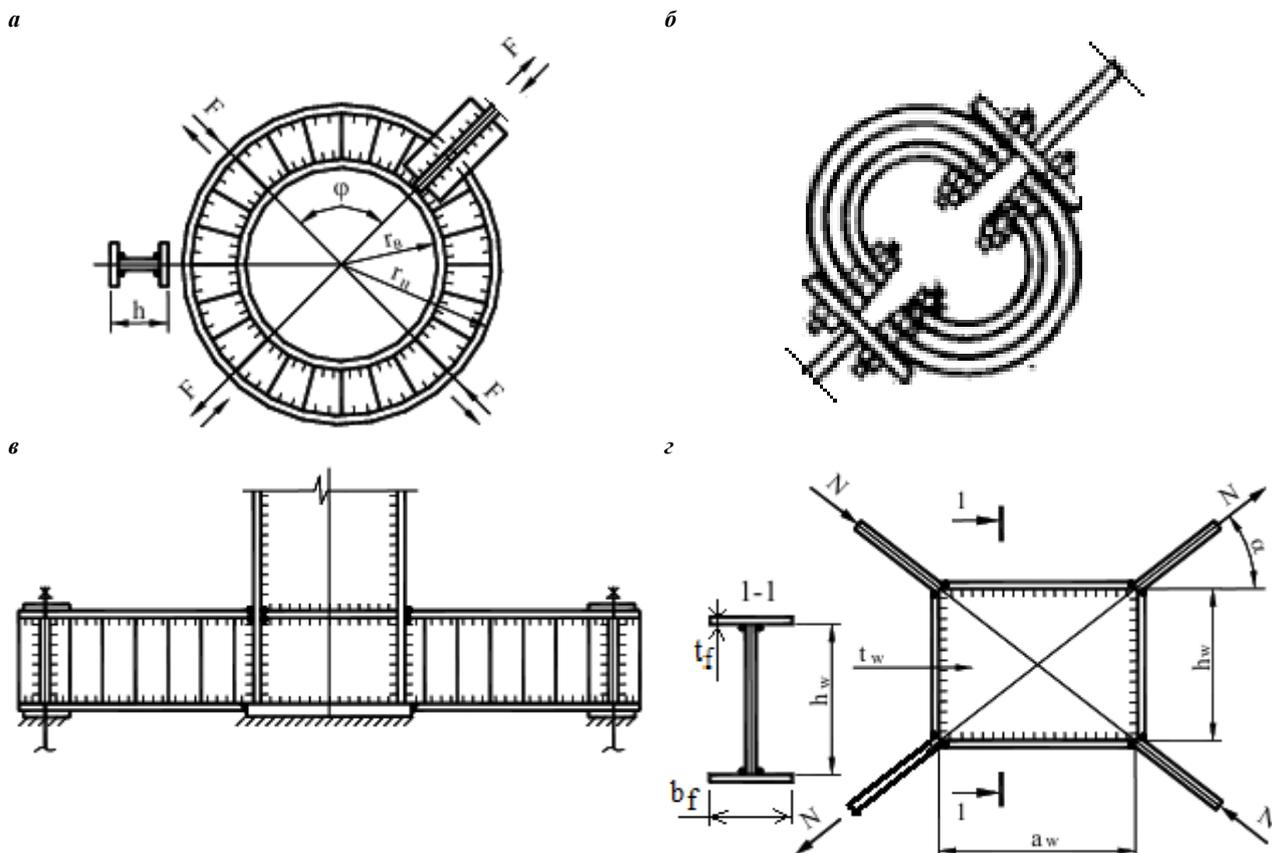
<sup>2</sup> См. сноску 1.

<sup>3</sup> НТП РК 08-01.5-2013. Проектирование сейсмостойких зданий. Ч. 1. Проектирование зданий из стальных конструкций. – Астана, 2024. – 251 с.

<sup>4</sup> НТП РК-03-02.1-2012 (к СН РК EN 1993-2:2006/2011). Нормативно-техническое пособие Республики Казахстан. Проектирование стальных конструкций. Стальные мосты. – Астана, 2015. – 152 с.

Простыми по конструкции, надежными в работе и обладающими высокими демпфирующими свойствами являются поглотители сейсмической энергии, принцип действия которых основан на повторно-переменном упругопластическом деформировании низкоуглеродистой стали (рисунок 1). Их эффективность доказана более чем полувековой надежной работой многоэтажных зданий и промышленных сооружений с ЭП в Казахстане, других государствах Средней Азии [5–7]. Такие ЭП приспособлены для изготовления на заводах металлических, в т.ч. мостовых конструкций.

Однако в мостах, расположенных в сейсмоопасных районах, эти ЭП не применялись. Проектирование таких ЭП может выполняться по действующим нормам Республики Казахстан<sup>5</sup>.



*a* – кольцевой; *б* – трубчатый; *в* – балочный; *г* – сдвиговой

Рисунок 1. – Упругопластические энергопоглотители [8]

Основные типы упругопластических ЭП представлены на рисунке 2.

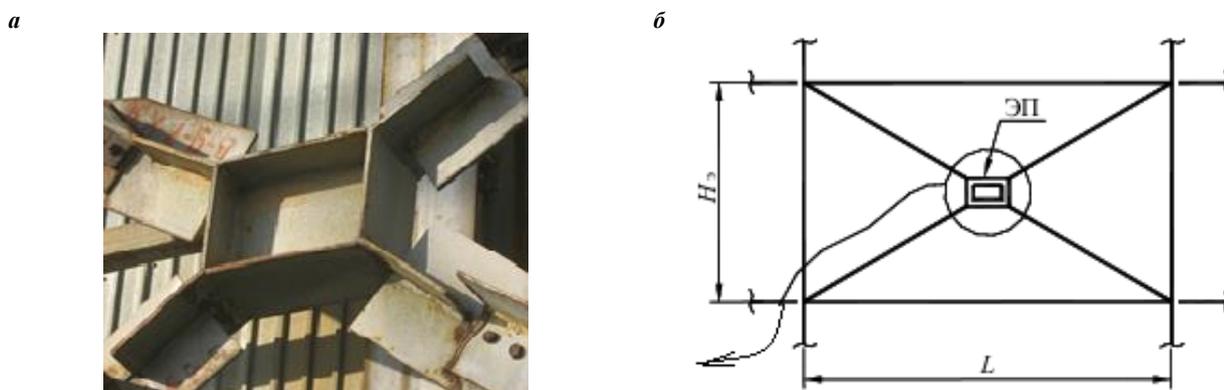


Рисунок 2. – Вид энергопоглотителя сдвигового типа, установленного в связевую систему многоэтажного здания [8]

<sup>5</sup> См. сноски 3 и 4.

Рассмотрим особенности проектирования ЭП сдвигового типа (далее – ЭПС)<sup>6</sup>. Активным элементом ЭПС, воспринимающим и преобразующим сейсмическую энергию, является стенка. Ее требуемая площадь поперечного сечения определяется из условий работы на сдвиг:

$$A_w = \frac{T_w}{0,5\sigma_{\text{тy}}}, \quad (1)$$

где  $T_w = 2N\cos\alpha - \frac{\sigma_{\text{тy}}b_f t_f^2}{h_w}$  – усилие, сдвигающее стенку ЭПС вдоль горизонтальной оси;

$N$  – усилие, действующее на ЭПС (см. рисунок 2,  $z$ );

$\sigma_{\text{тy}} = 1,4R_y$ ,  $R_y$  – расчетное сопротивление стали.

Окончательно толщину стенки назначают из условия обеспечения ее местной устойчивости не менее  $1/30 h_w$ .

Толщину  $t_f$  каждой из четырех пластин, передающих сдвиговые усилия на активный элемент толщиной  $t_w$ , назначают из условия прочности:

$$t_f = N\cos\alpha / (b_f 0,8\sigma_{\text{тy}}), \quad (2)$$

где  $0,8$  – коэффициент условий работы.

**Эффективность поглощения энергии землетрясений ЭП, работающих в упругопластической стадии на переменные нагрузки от землетрясений.** Опыт эксплуатации многоэтажных зданий со стальным каркасом в сейсмоопасных районах показал, что за период эксплуатации они воспринимают около 80 циклов знакопеременных сейсмических нагрузок [8]. Сравнить энергоемкость различных ЭП при знакопеременных нагрузках можно по удельной энергопоглощающей способности  $\overline{W}_{\text{ц}}$ . В качестве критерия Г.М. Остриковым предложено [8] рассматривать поглощающую способность единицы массы активного элемента ЭП, «определенную при одинаковом уровне максимальных относительных деформаций материала за пределом упругости» и отнесенную к одному циклу переменной нагрузки.

Поглощенная при пластическом деформировании активного элемента удельная энергия  $\overline{W}_{\text{ц}}$  определяется работой внутренних напряжений на соответствующих пластических деформациях. В работе [8] предложены формулы для расчета удельной энергии  $\overline{W}_{\text{ц}}$ , поглощаемой активным пластинчатым элементом ЭП за один цикл жесткого нагружения при его работе:

– на растяжение

$$\overline{W}_{\text{цр}} \approx 2\sigma_{\text{тy}}^2(e - 1)/E\gamma; \quad (3)$$

– на изгиб

$$\overline{W}_{\text{цр}} \approx 1,15\sigma_{\text{тy}}^2(e - 1)^2/eE\gamma; \quad (4)$$

– сдвиг

$$\overline{W}_{\text{цр}} \approx 1,73\sigma_{\text{тy}}^2(e - 1)/E\gamma, \quad (5)$$

где  $e = \varepsilon/\varepsilon_{\text{т}}$  – уровень пластического деформирования;

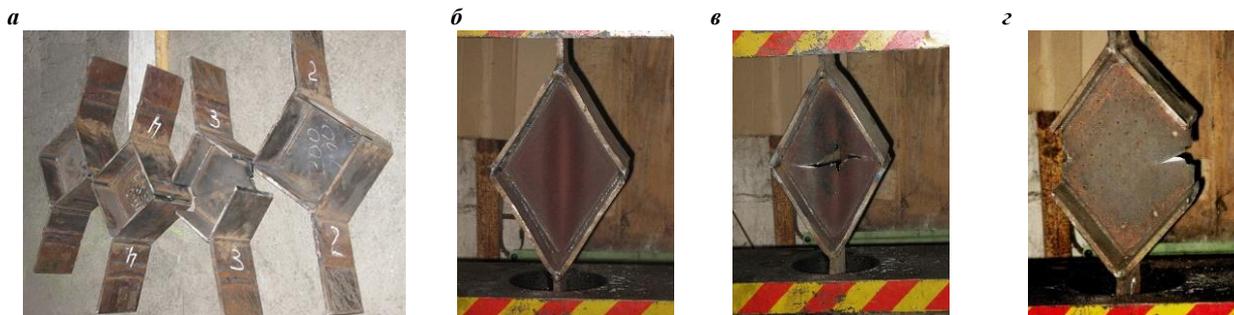
$\gamma$  – угол сдвига.

При выводе формул предполагалось, что активные элементы ЭП не содержат концентраторов деформаций, а пластические деформации определяются условием пластичности Генки-Мизеса.

Из зависимостей (3)–(5) следует, что наибольшей удельной энергоемкостью обладают активные элементы ЭП, выполненные из пластичных сталей ВСтЗсп5, 09Г2С и подверженные в процессе работы деформациям растяжения-сжатия и сдвига. Применение их в мостовых конструкциях для повышения сейсмостойкости пролетных строений мостов и зон их сопряжений с опорами потребует соответствующей доработки конструктивных форм ЭП и дополнительных исследований их работы.

**Поля температур поверхности образцов ЭПС.** Общие виды образцов ЭПС показаны на рисунке 3, *а*. Размеры образцов – 220×220 мм, толщина листов – 10 мм. Материал – ВСтЗспб. Нагружение производилось в испытательной машине Р-100 с записью диаграммы «нагрузка-удлинение» квазистатически, растягивающим усилием до разрушения. Испытания и обработка данных выполнялись в соответствии с требованиями ГОСТ 1497. Процесс деформирования образцов отображался в термофильмах с помощью компьютерного термографа «ИРТИС-2000», а обработка результатов велась программным пакетом IRTIS.

<sup>6</sup> См. сноски 1, 3 и 4.

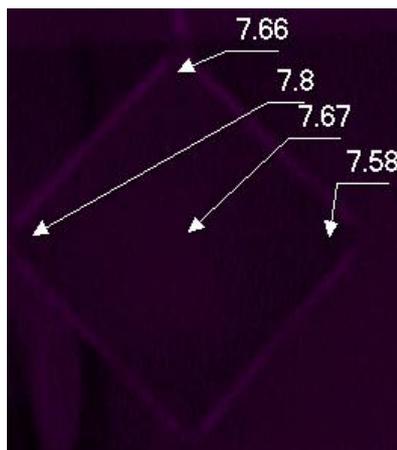


**а** – образцы ЭПС перед испытанием; **б** – вид образца типа ЭПС с активным элементом без конструктивных концентраторов; **в** – вид образца типа ЭПС с отверстием в середине активного элемента; **з** – вид образца типа ЭПС с боковыми вырезами в активном элементе

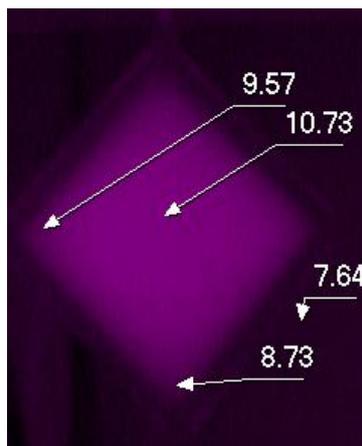
**Рисунок 3.** – Экспериментальные энергопоглотители ЭПС и их вид в стадии предразрушения

Кадры термофильма образца без конструктивных дефектов в стенке приведены на рисунке 4, из которого следует, что температурное поле в упругой стадии работы материала стенки равномерное, без аномалий. Также нет аномалий при работе материала стенки в пластической стадии. В стадии самоупрочнения металла неоднородность появляется при образовании волны в стенке (см. рисунок 3, б).

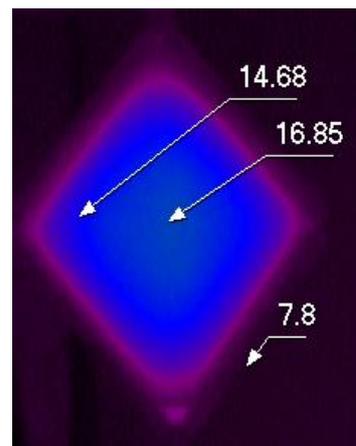
Кадр 1. Время 2.3 с



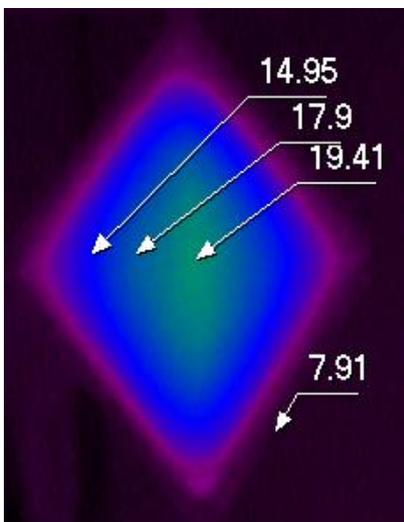
Кадр 27. Время 63 с



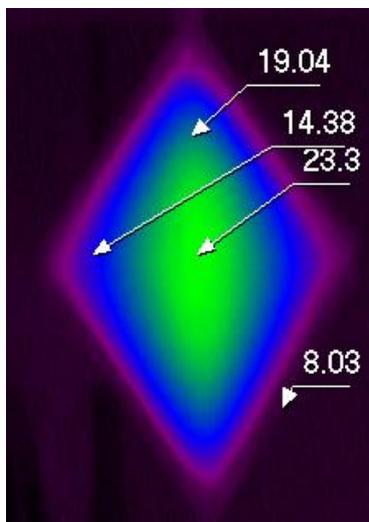
Кадр 50. Время 116 с



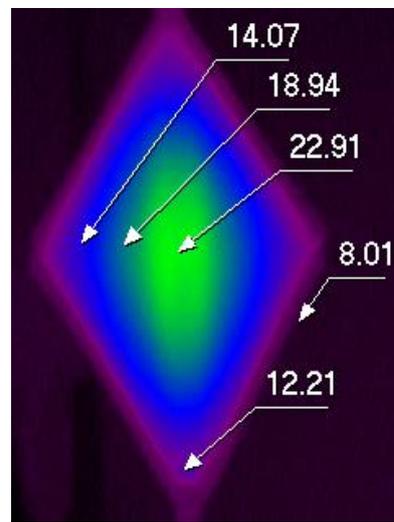
Кадр 58. Время 135 с



Кадр 76. Время 177 с



Кадр 110. Время 256 с



**Рисунок 4.** – Кадры термофильма деформационного нагрева образца без дефектов в стенке

В образцах с конструктивными дефектами (отверстия, вырезы) температурные аномалии проявляются при переходе от упругой работы стали к упругопластической и сопровождаются непрерывным ростом температуры в месте зарождения и развития трещины.

**Возможное расположение ЭП в мостовых балочных сооружениях.** Предполагаем, что устои моста и промежуточные опоры выполнены в соответствии с требованиями норм проектирования сейсмостойких мостов. Тогда энергопоглотители целесообразно устанавливать в местах сопряжений пролетных строений с опорами, конструкций пролетных строений между собой.

**Заключение.** На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. На основании опыта строительства и эксплуатации многоэтажных сейсмостойких зданий, оснащенных энергопоглотителями с активными стальными элементами, работающими в упругопластической и пластической стадиях, предложено отдельные из них (ЭПС и др.) применять для повышения сейсмостойкости пролетных строений мостов и зон их сопряжений с опорами с соответствующей доработкой конструктивных форм ЭП и дополнительных исследованиями их работы.

2. Экспериментально, с использованием лабораторных образцов из малоуглеродистой пластичной стали доказано, что в окрестности конструктивно-технологических дефектов (отверстия, вырезы) в растянутых и сдвигаемых элементах конструкций ЭП происходит локализация деформаций, особенно при упруго-пластической и пластической стадиях работы стали, с повышением средней температуры поверхности стали при деформировании на несколько десятков градусов, что позволяет в режиме мониторинга по температурному полю активного элемента контролировать работоспособность элементов стальных пролетных сооружений мостов и энергопоглотителей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Raab Nigel. The Tashkent Earthquake of 1966: The Advantages and Disadvantages of a Natural Tragedy // *Jahrbücher für Geschichte Osteuropas*. – 2014. – № 62(2). – P. 273–294. URL: <https://www.jstor.org/stable/43819634>.
2. Нишоннов Н.А., Солиев Д.Т., Куйчиев О.А. Особенности повреждения искусственных сооружений при землетрясениях // *Scientific progress*. – 2021. – Т. 2, № 7. – С. 854–860. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-povrezhdeniya-iskusstvennyh-sooruzheniy-pri-zemletryaseniayah>.
3. Исследование повреждения дорожных сооружений при сильных землетрясениях / М.Ч. Апсеметов, Д.К. Мурзакматов, Э.Э. Женишибеков и др. // *Изв. ОшГУ*. – 2017. – № 3. – С. 36–42. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-povrezhdeniya-iskusstvennyh-sooruzheniy-pri-zemletryaseniayah>.
4. Анализ повреждений зданий и мостовых сооружений при сильных землетрясениях / М.Ч. Апсеметов, Д.К. Мурзакматов, А.А. Приходько и др. // *Вестн. Кыргыз. гос. ун-та стр-ва, транспорта и архитектуры*. – 2019. – № 3. – С. 479–483.
5. Жунусов Т.Ж., Апсеметов М.Ч. Сейсмоизолирующие узлы в конструкциях мостов // *Вестн. КГУСТА*. – 2002. – № 1. – С. 49.
6. Апсеметов М.Ч., Андашев А.Ж. Разработка надежных и технологичных конструкций сейсмоизолирующих опор из упругих, пластичных и антифрикционных материалов // *Вестн. Кыргыз. гос. ун-та стр-ва, транспорта и архитектуры*. – 2012. – № 3. – С. 82–89.
7. Апсеметов М.Ч., Айдаралиев А.Е., Шекербек У.Т. Сейсмоизоляция пролетных строений балочных мостов // *Вестн. Кыргыз. гос. ун-та стр-ва, транспорта и архитектуры*. – 2006. – Т. 6, № 9. – С. 152–156.
8. Остриков Г.М., Максимов Ю.С. Стальные сейсмостойкие каркасы многоэтажных зданий. – Алма-Ата: Казахстан, 1985. – 120 с.

#### REFERENCES

1. Raab, Nigel (2014). The Tashkent Earthquake of 1966: The Advantages and Disadvantages of a Natural Tragedy. *Jahrbücher für Geschichte Osteuropas*, 62(2), 273–294. URL: <https://www.jstor.org/stable/43819634/>
2. Nishonov, N.A. Osobennosti povrezhdeniya iskusstvennyh sooruzhenij pri zemletryaseniayah / N.A. Nishonov, D.T. Soliev, O.A. Kujchiev // *Scientific progress*. – 2021. – Т. 2, № 7. – С. 854–860. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-povrezhdeniya-iskusstvennyh-sooruzheniy-pri-zemletryaseniayah>.
3. Apsemetov, M.Ch. Issledovanie povrezhdeniya dorozhnyh sooruzhenij pri sil'nyh zemletryaseniayah / M.Ch. Apsemetov, D.K. Murzakmatov, E.E. Zhenishbekov, A.O. Shekaev // *Izvestiya OshTU*. – 2017. – № 3. – С. 36–42. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-povrezhdeniya-iskusstvennyh-sooruzheniy-pri-zemletryaseniayah>.
4. Apsemetov, M.Ch. Analiz povrezhdenij zdaniy i mostovyh sooruzhenij pri sil'nyh zemletryaseniayah / M.Ch. Apsemetov, D.K. Murzakmatov, A.A. Prihod'ko, A.A. Toguztoroev // *Vestnik Kyrgyzskogo gosudarstvennogo universiteta stroitel'stva, transporta i arhitektury*. – 2019. – № 3. – С. 479–483.
5. Zhunusov, T.Zh. Sejsmoizoliruyushchie uzly v konstrukciyah mostov / T.Zh. Zhunusov, M.Ch. Apsemetov // *Vestnik KGUSTA*. – 2002. – № 1. – С. 49.
6. Apsemetov, M.Ch. Razrabotka nadezhnyh i tekhnologichnyh konstrukcij sejsmoizoliruyushchih opor iz uprugih, plastichnyh i antifrikcionnyh materialov / M.Ch. Apsemetov, A.Zh. Andashev // *Vestnik Kyrgyzskogo gosudarstvennogo universiteta stroitel'stva, transporta i arhitektury*. – 2012. – № 3. – С. 82–89.
7. Apsemetov, M.Ch. Sejsmoizolyaciya proletnyh stroenij balochnykh mostov / M.Ch. Apsemetov, A.E. Ajdaraliev, U.T. Shekerbekov // *Vestnik Kyrgyzskogo gosudarstvennogo universiteta stroitel'stva, transporta i arhitektury*. – 2006. – Т. 6, № 9. – С. 152–156.
8. Ostrikov, G.M., Stal'nye sejsmostojkie karkasy mnogoetazhnyh zdaniy / G.M. Ostrikov, Yu.S. Maksimov. – Alma-Ata: Kazahstan, 1985. – 120 s.

Поступила 26.03.2025

**HEAT GENERATION IN ENERGY ABSORBERS OF SHEAR TYPE**

***E. MOISEYCHIK, SH. ESHONKHUJAEVA***  
***(Belarusian National Technical University, Minsk)***

*Based on the analysis of literature sources, it is shown that steel energy absorbers using the active elements in the elastic-plastic and plastic stages of work can be used to protect massive bridge structures. The article proposes locations of elastic-plastic steel energy absorbers in span bridge structures and shows their energy efficiency. Experimentally, using laboratory samples made of low-carbon plastic steel, it has been proven that in the vicinity of structural and technological defects (holes, cutouts) in stretched and sheared elements of EA structures, localization of deformations occurs, especially at the elastic-plastic and plastic stages of steel work, with an increase in the average temperature of the steel surface during deformation by several tens of degrees (up to 90°C), which allows in the mode monitoring by the temperature field of the active element to control the performance of elements of steel span structures of bridges and energy absorbers.*

**Keywords:** *seismic resistance, energy absorbers, shear deformations, energy capacity, heat generation.*

## СОДЕРЖАНИЕ

### СТРОИТЕЛЬСТВО

<i>Лазовский Д.Н., Глухов Д.О., Хаткевич А.М., Гиль А.И., Колтунов А.И., Чапаранганда Э.</i> Практическое моделирование напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов при силовом и температурном воздействиях .....	2
<i>Лазовский Д.Н., Шохина Л.М., Поправко А.В., Глухова Т.М.</i> Оценка прочности сталежелезобетонных конструкций книгохранилища Национальной библиотеки Республики Беларусь.....	13
<i>Велюго Е.С., Ермак А.А., Ющенко В.Д.</i> Гидрохимические модели удаления железа и марганца на кварцевом песке и сорбенте АС .....	23
<i>Кожарский С.Г., Капустина О.В., Булавка Ю.А.</i> Подготовка и обучение работников как элемент обеспечения безопасности при строительстве атомной электростанции в Арабской Республике Египет .....	31
<i>Меженцев А.А., Бурак Г.А.</i> Известь на основе шлама водоочистки ТЭС.....	36
<i>Мойсейчик Е.А., Эшонхужаева Ш.А.</i> Теплообразование в энергопоглощающих элементах сдвигового типа.....	42