



УДК 624.012.45

DOI: 10.22227/2949-1622.2023.4.3-12

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/ RESEARCH ARTICLE

## Влияние отрицательных температур на прочность и деформативность железобетонного элемента

А.Д. Истомин<sup>1\*</sup>, В.А. Петрова<sup>2</sup><sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация<sup>2</sup>ООО «Смарт Констракшн», Москва, Российская Федерация

\*nauka.07@mail.ru

**Ключевые слова:** центрально-растянутый железобетонный элемент, климатическая и технологическая отрицательная температура, деформативно-прочностные свойства арматуры, прочность, модуль упругости, трещинообразование.

### История статьи

Поступила в редакцию: 13.07.2023

Доработана: 23.07.2023

Принята к публикации: 28.07.2023

### Для цитирования

Истомин А.Д., Петрова В.А. Влияние отрицательных температур на прочность и деформативность железобетонного элемента // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 4. № 4. С. 3–12.

**Аннотация.** Одной из основных составляющих экономического развития Российской Федерации является современная тенденция освоения территорий Крайнего Севера и Арктики. Необходимость такого развития закреплена на государственном уровне в различных программах. Опыты по исследованию влияния отрицательных температур на работу арматурной стали показывают, что при понижении температуры наблюдается повышение прочности и модуля упругости. При этом нет единых рекомендаций по деформативно-прочностным свойствам арматуры для расчета железобетонных конструкций в условиях низких и сверхнизких отрицательных температур. Нормы РФ не учитывают влияние климатических (до  $-70^{\circ}\text{C}$ ) и технологических (до  $-196^{\circ}\text{C}$ ) отрицательных температур на деформативные и прочностные характеристики арматурной стали. Цель данной работы заключалась в экспериментальном исследовании влияния отрицательных температур (до  $-196^{\circ}\text{C}$ ) на деформативно-прочностные свойства арматуры, бетона и железобетонных стержневых элементов. В качестве опытных образцов были приняты бетонные призмы  $10\times 10\times 40$  см, образцы арматуры периодического профиля класса А400 и железобетонные призматические стержни с размером сечения  $12\times 18$  см и процентом армирования 1,45%. При этом варьировалась отрицательная температура испытаний. В результате проведенных исследований с центрально-растянутыми железобетонными элементами установлено, что понижение температуры до  $-165^{\circ}\text{C}$  приводит к увеличению усилия трещинообразования на 162%; прочности на 85%. Предложены эмпирические зависимости для определения деформативно-прочностных характеристик арматурной стали в зависимости от отрицательной температуры.

## Effect of Negative Temperatures on the Strength and Deformability of a Reinforced Concrete Element

Andrey D. Istomin<sup>1\*</sup>, Victoria A. Petrova<sup>2</sup><sup>1</sup>Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoeshosse, Moscow, 129337, Russian Federation<sup>2</sup>Smart Construction LLC, Moscow, Russian Federation\* [nauka.07@mail.ru](mailto:nauka.07@mail.ru)

Андрей Дмитриевич Истомин, кандидат технических наук, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARY SPIN-код: 9514-0436, Scopus: 57197846263, E-mail: [nauka.07@mail.ru](mailto:nauka.07@mail.ru).

Виктория Алексеевна Петрова, ведущий инженер, ООО «Смарт Констракшн», 121205, г. Москва, ул. Нобеля (Инновационный Центр Сколково), д. 5; eLIBRARY SPIN-код: 5768-9489, E-mail: [visiren@mail.ru](mailto:visiren@mail.ru).

© Истомин А.Д., Петрова В.А., 2023



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

**Keywords:** centrally tensioned reinforced concrete element, climatic and technological negative temperature, deformation-strength properties of reinforcement, strength, modulus of elasticity, cracking.

#### Article history

Received: 13.07.2023

Revised: 23.07.2023

Accepted: 28.07.2023

#### For citation

Istomin A.D., Petrova V.A. Effect of Negative Temperatures on the Strength and Deformability of a Reinforced Concrete Element. *Reinforced Concrete Structures*. 2023;4 (4): 3–12.

**Abstract.** One of the main components of the economic development of the Russian Federation is the current trend in the development of the territories of the Far North and the Arctic. The need for such development is enshrined at the state level in various programs. Experiments on the study of the effect of negative temperatures on the operation of reinforcing steel show that with decreasing temperature, an increase in strength and modulus of elasticity is observed. At the same time, there are no unified recommendations on the deformation and strength properties of reinforcement for calculating reinforced concrete structures under conditions of low and ultra-low negative temperatures. RF standards do not take into account the influence of climatic (up to  $-70^{\circ}\text{C}$ ) and technological (up to  $-196^{\circ}\text{C}$ ) negative temperatures on the deformation and strength characteristics of reinforcing steel.

The purpose of this work was to experimentally study the effect of negative temperatures (up to  $-196^{\circ}\text{C}$ ) on the deformation-strength properties of reinforcement, concrete and reinforced concrete rod elements. Concrete prisms  $10 \times 10 \times 40$  cm, samples of reinforcement of a periodic profile of class A400 and reinforced concrete prismatic rods with a section size of  $12 \times 18$  cm and a reinforcement percentage of 1.45% were taken as prototypes. At the same time, the negative temperature of the tests varied. As a result of the studies carried out with centrally stretched reinforced concrete elements, it was found that lowering the temperature to  $-165^{\circ}\text{C}$  leads to an increase in the cracking force by 162%; strength by 85%. Empirical dependencies are proposed to determine the deformation-strength characteristics of reinforcing steel, depending on the negative temperature.

## ВВЕДЕНИЕ

Проектирование железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в условиях низких температур, должно учитывать их влияние на деформативно-прочностные характеристики бетона и арматуры [1-6].

Испытания при низких температурах более сложны, чем такие же испытания при положительной температуре, так как необходимо замораживание образцов с помощью холодильных камер и криостатов, использование специальных средств измерения температуры и деформации образцов [7].

Большее внимание исследователей уделялось и уделяется влиянию отрицательных температур на свойства бетона [8-11]. Исследования деформативно-прочностных свойств арматуры в условиях отрицательных температур более интенсивно стали проводиться с началом интенсивного строительства резервуаров для сжиженного газа [7,12,13]. При этом испытания ограничиваются температурами от  $-120^{\circ}\text{C}$  до  $-196^{\circ}\text{C}$ . Климатические условия отдельных регионов Российской Федерации характеризуются температурами  $-70^{\circ}\text{C}$  и ниже [14]. Широкомасштабные исследования по влиянию отрицательных температур на характеристики стальной арматуры проводились В.З. Мешковым и Н.М. Мулиным [15-17]. На основании проведенных исследований были рекомендованы зависимости для модуля упругости и предела текучести горячекатаной арматуры при изменении температуры до  $-196^{\circ}\text{C}$ .

Модуль упругости арматуры предлагается определять по формуле:

$$E_{s,T} = E_s \cdot [1 + 2,3 \cdot 10^{-4} (20 - T)], \quad (1)$$

где  $E_{s,T}$  – модуль упругости арматурной стали при температуре  $T$ ,

$E_s$  – модуль упругости арматурной стали в нормальных условиях ( $T = +20^{\circ}\text{C}$ ),

$T$  – температура арматурного стержня,  $^{\circ}\text{C}$ .

**Andrey D. Istomin**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, eLIBRARY SPIN-код: 9514-0436, E-mail: nauka.07@mail.ru.

**Victoria A. Petrova**, Lead Engineer, Smart Construction LLC, 5 Nobel Street, (Skolkovo Innovation Center) Moscow, 121205, Russian Federation, eLIBRARY SPIN-код: 5768-9489, E-mail: visiren@mail.ru.

Для предела текучести (прочности на растяжение) рекомендована формула:

$$R_{s,T} = R_s + a \cdot (20 - T)^n, \quad (2)$$

где  $R_s$  – прочность на растяжение (предел текучести в МПа) арматурной стали в нормальных условиях,

$T$  – температура арматурного стержня,  $^{\circ}\text{C}$ .

$a$  – эмпирический коэффициент с размерностью МПа/(град  $^{\circ}\text{C}$ ) $^n$ ,

$n$  – показатель степени в зависимости от наличия или отсутствия физической площадки текучести.

Полученные из опыта значения коэффициента « $a$ » для различных классов арматуры марок стали приведены в таблице 1.

Таблица 1

Значения коэффициента « $a$ » в формуле (2)

| Класс арматуры                                    | A300 (A-II)           |                      | A400 (A-III)          | A600 (A-IV)          | A800 (A-V)           |
|---------------------------------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| Марка стали                                       | Вст5сп2               | 10ГТ                 | 35ГС                  | 80С                  | 23Х2Г2Т              |
| Коэффициент $a$ , МПа/( $^{\circ}\text{C}$ ) $^n$ | $11,5 \times 10^{-4}$ | $8,0 \times 10^{-4}$ | $9,53 \times 10^{-4}$ | $7,8 \times 10^{-2}$ | $5,0 \times 10^{-2}$ |
| Показатель степени $n$                            | 2                     | 2                    | 2                     | 1                    | 1                    |

Table 1

The values of the coefficient  $a$  in the formula (2)

| Reinforcement class                                | A300 (A-II)           |                      | A400 (A-III)          | A600 (A-IV)          | A800 (A-V)           |
|----------------------------------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| Steel grade                                        | Вст5сп2               | 10ГТ                 | 35ГС                  | 80С                  | 23Х2Г2Т              |
| Coefficient $a$ , МПа /( $^{\circ}\text{C}$ ) $^n$ | $11.5 \times 10^{-4}$ | $8.0 \times 10^{-4}$ | $9.53 \times 10^{-4}$ | $7.8 \times 10^{-2}$ | $5.0 \times 10^{-2}$ |
| Exponent $n$                                       | 2                     | 2                    | 2                     | 1                    | 1                    |

При этом отмечено, что предложенные зависимости не отражают физической сущности явления роста  $R_s$  и могут быть использованы только для приближенных инженерных расчетов.

Авторы работы [13] предложили следующие зависимости для вычисления прочности арматурной стали и модуля упругости соответственно:

$$R_{s,T} = m_{a,m} R_s, \quad (3)$$

где коэффициент условия работы определяется по формулам:

$$m_{a,m} = 1 + 0,0016T \text{ при } -130^{\circ}\text{C} \leq T \leq -60^{\circ}\text{C}, \quad (4)$$

$$m_{a,m} = 1,2 + 0,013T \text{ при } T < -130^{\circ}\text{C}; \quad (5)$$

$$E_{s,T} = \beta_a E_s, \quad (6)$$

где коэффициент  $\beta_a$  определяется по формуле:

$$\beta_a = 1 + 0,0003T \text{ при } T \leq -60^{\circ}\text{C}. \quad (7)$$

В других исследованиях также выявлено влияние отрицательных температур на свойства стальной арматуры [17-19]. Но, как правило, не даются зависимости для их определения, а констатируется процентное изменение этих показателей по отношению к нормальным условиям.

Для оценки влияния изменения деформативно-прочностных характеристик бетона и арматуры при отрицательных температурах на напряженно-деформированное состояние железобетонных элементов проводятся соответствующие экспериментальные исследования [20-23].

В связи с вышеизложенным были проведены исследования свойств стальной арматуры при изменении температуры от  $+15^{\circ}\text{C}$  до  $-196^{\circ}\text{C}$ . При этих же температурных условиях были проведены экспериментальные исследования железобетонных образцов на центральное растяжение. Отдельные результаты этих исследований приводятся в данной работе.

МЕТОД

Опытные железобетонные образцы представляли собой призмы с размерами поперечного сечения 12см x 18см и длиной 80см. Образцы армировались четырьмя арматурными стержнями периодического профиля Ø10 мм класса А400. Процент продольного армирования составлял  $\mu = 1,45\%$ . По торцам элемента устанавливались закладные детали, к которым приваривались проушины шарнирных опор. Толщина защитного слоя рабочей арматуры была принята 25 мм.

Методика испытаний железобетонных образцов заключалась в следующем. Образец, помещенный в силовую установку при температуре +15°C, замораживался до необходимой температуры. Затем образец растягивался двумя гидравлическими домкратами. Растягивающее усилие прикладывалось ступенями, равными  $0,1N_{ult}$ . При испытаниях до -70°C перемещения измерялась с помощью четырех индикаторов, установленных на арматуре, на базе 400мм, а деформации тензодатчиками базой 20мм, расположенных на арматурных стержнях. При испытаниях ниже -70°C деформации арматуры измерялись только с помощью тензодатчиков. Испытания при температуре до -70°C включительно проводились в термобарокамере ТВВ-8000 с рабочим объемом 8м³. При температуре ниже -70°C испытания проводились в специальной установке, расположенной в термокамере.

Перед испытанием железобетонных стержней были проведены испытания стальной арматуры периодического профиля в диапазоне температур +15°C ... -190°C. В качестве опытных образцов использовались арматурные стержни диаметром 10 и 12 мм. Перед отбором и испытанием образцов производился визуальный осмотр с помощью лупы на предмет отсутствия механических повреждений. При испытании арматурных стержней на растяжение учитывались положения стандартов ГОСТ 12004-81, ГОСТ 1497—84, ГОСТ 11150-84, ГОСТ 2206-77.

Деформативно-прочностные характеристики бетона определялись на бетонных призмах размером 10x10x40см.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Деформативно-прочностные характеристики бетона, полученные в эксперименте, представлены в таблице 2.

Таблица 2

| Деформативно-прочностные характеристики бетона |         |                      |                            |                                    |                            |                               |                                                |
|------------------------------------------------|---------|----------------------|----------------------------|------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------|
| $T^0C$                                         | $W, \%$ | $R_{bt}, \text{МПа}$ | $\frac{R_{bt}}{R_{bt,15}}$ | $E_{bt} \cdot 10^{-3}, \text{МПа}$ | $\frac{E_{bt}}{E_{bt,15}}$ | $\varepsilon_{bt} \cdot 10^5$ | $\frac{\varepsilon_{bt}}{\varepsilon_{bt,15}}$ |
| 15                                             | 5,25    | 1,3                  | 1,0                        | 22,3                               | 1,0                        | 8,0                           | 1,0                                            |
| -50                                            | 5,25    | 2,64                 | 2,03/2,42                  | 30,1                               | 1,35                       | 14                            | 1,75                                           |
| -70                                            | 5,25    | 2,99                 | 2,3/2,48                   | 32,3                               | 1,45                       | 17,0                          | 2,1                                            |
| -165                                           | 5,25    | 3,18                 | 2,45                       | 35,46                              | 1,62                       | 20                            | 2,5                                            |

Table 2

| Deformation-strength characteristics of concrete |         |                      |                            |                                    |                            |                               |                                                |
|--------------------------------------------------|---------|----------------------|----------------------------|------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------|
| $T^0C$                                           | $W, \%$ | $R_{bt}, \text{MPa}$ | $\frac{R_{bt}}{R_{bt,15}}$ | $E_{bt} \cdot 10^{-3}, \text{MPa}$ | $\frac{E_{bt}}{E_{bt,15}}$ | $\varepsilon_{bt} \cdot 10^5$ | $\frac{\varepsilon_{bt}}{\varepsilon_{bt,15}}$ |
| 15                                               | 5.25    | 1.3                  | 1.0                        | 22.3                               | 1.0                        | 8.0                           | 1.0                                            |
| -50                                              | 5.25    | 2.64                 | 2.03/2.42                  | 30.1                               | 1.35                       | 14                            | 1.75                                           |
| -70                                              | 5.25    | 2.99                 | 2.3/2.48                   | 32.3                               | 1.45                       | 17.0                          | 2.1                                            |
| -165                                             | 5.25    | 3.18                 | 2.45                       | 35.46                              | 1.62                       | 20                            | 2.5                                            |

Из полученных результатов видно, что с понижением температуры до -165°С прочность бетона на растяжение увеличилась в 2,45 раза, модуль упругости увеличился в 1,62 раза, предельная растяжимость (при  $\sigma_{bt} = R_{bt}$ ) увеличилась в 2,5 раза. Необходимо отметить, что начальный модуль упругости определялся при испытании бетонных призм на сжатие. Влажность бетона на момент испытания составила  $W=5,25\%$ .

Повышение деформативно-прочностных характеристик бетона в условиях отрицательных температур учитывают с помощью соответствующих коэффициентов условий работы [3,4,5]. Коэффициенты условий работы соответственно для прочности бетона при растяжении и для его начального модуля упругости на основании анализа и обобщения результатов испытаний рекомендуется определять по формулам:

$$\gamma_{b,t} = 1 + n_{bt} \cdot 0,75 \cdot (1 - e^{0,06T}), \tag{8}$$

$$\gamma_{b,E} = 1 + n_E \cdot 0,75 \cdot (1 - e^{0,015T}), \tag{9}$$

где  $n_{bt}$ ,  $n_E$  - эмпирические коэффициенты,

$T$  - температура конструкции ( $-196^{\circ}\text{C} \leq T \leq 0^{\circ}\text{C}$ ).

Значения соответствующих коэффициентов, входящие в формулу (2), (3) представлены в таблице 3 (значения коэффициентов  $n_{bt}$ ,  $n_E$ ).

Таблица 3

| Коэффициенты | Влажность бетона |                           |             |
|--------------|------------------|---------------------------|-------------|
|              | $W < 4,0\%$      | $4,0\% \leq W \leq 6,0\%$ | $W > 6,0\%$ |
| $n_{bt}$     | 0,5              | 2                         | 2,5         |
| $n_E$        | 0,3              | 0,9                       | 1,2         |

Table 3

| Coefficient | Moisture content of concrete |                           |             |
|-------------|------------------------------|---------------------------|-------------|
|             | $W < 4,0\%$                  | $4,0\% \leq W \leq 6,0\%$ | $W > 6,0\%$ |
| $n_{bt}$    | 0,5                          | 2                         | 2,5         |
| $n_E$       | 0,3                          | 0,9                       | 1,2         |

Результаты испытания образцов арматуры класса А400, отобранных из тех же стержней, что применялись для армирования железобетонных призм, приведены в таблице 4.

Таблица 4

| Деформативно-прочностные характеристики арматуры класса А400 |                                 |                       |                   |                       |                        |                                 |
|--------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------------|
| $T, ^{\circ}\text{C}$                                        | $E_{s,t} \cdot 10^{-5},$<br>МПа | $\frac{E_{s,t}}{E_s}$ | $R_{s,t},$<br>МПа | $\frac{R_{s,t}}{R_s}$ | $\sigma_{e,t},$<br>МПа | $\frac{\sigma_{e,t}}{\sigma_e}$ |
| +15                                                          | 2,0                             | 1,00/1,00             | 433               | 1,00/1,00             | 656                    | 1,00/1,00                       |
| -30                                                          | 2,08                            | 1,04/1,03             | 455               | 1,05/1,05             | 685                    | 1,04/1,06                       |
| -50                                                          | 2,1                             | 1,05/1,04             | 475               | 1,10/1,11             | 704                    | 1,07/1,09                       |
| -70                                                          | 2,16                            | 1,08/1,06             | 510               | 1,18/1,18             | 728                    | 1,11/1,12                       |
| -165                                                         | 2,22                            | 1,11/1,10             | 780               | 1,80/1,73             | 826                    | 1,26/1,24                       |
| -190                                                         | 2,25                            | 1,13/1,10             | 863               | 1,99/1,93             | 833                    | 1,27/1,26                       |

Table 4

| Deformation-strength characteristics of reinforcement A400 class |                                 |                       |                   |                       |                        |                                 |
|------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------------|
| $T, ^\circ C$                                                    | $E_{s,t} \cdot 10^{-5},$<br>MPa | $\frac{E_{s,t}}{E_s}$ | $R_{s,t},$<br>MPa | $\frac{R_{s,t}}{R_s}$ | $\sigma_{e,t},$<br>MPa | $\frac{\sigma_{e,t}}{\sigma_e}$ |
| +15                                                              | 2,0                             | 1,00/1,00             | 433               | 1,00/1,00             | 656                    | 1,00/1,00                       |
| -30                                                              | 2,08                            | 1,04/1,03             | 455               | 1,05/1,05             | 685                    | 1,04/1,06                       |
| -50                                                              | 2,1                             | 1,05/1,04             | 475               | 1,10/1,11             | 704                    | 1,07/1,09                       |
| -70                                                              | 2,16                            | 1,08/1,06             | 510               | 1,18/1,18             | 728                    | 1,11/1,12                       |
| -165                                                             | 2,22                            | 1,11/1,10             | 780               | 1,80/1,73             | 826                    | 1,26/1,24                       |
| -190                                                             | 2,25                            | 1,13/1,10             | 863               | 1,99/1,93             | 833                    | 1,27/1,26                       |

В таблице 4 над чертой приведены опытные значения, под чертой значения, рассчитанные по формулам (10) - (16).

Обобщенный анализ результатов исследований деформативно-прочностных характеристик арматурных сталей в условиях отрицательных температур, представленных в работах различных авторов, а также приведенных в данной статье, позволил определить эмпирические зависимости для основных характеристик арматурной стали в зависимости от отрицательной температуры. При этом принято, что при изменении температуры от  $+15^\circ C$  до  $0^\circ C$  характеристики арматуры постоянны.

Прочность арматуры при растяжении рекомендуется определять по формуле:

$$R_{s,t} = \gamma_{R,t} R_s, \quad (10)$$

где  $R_s$  – прочность арматуры в нормальных условиях,

$\gamma_{R,t} = R_{s,t}/R_s$  – коэффициент относительного изменения прочности арматуры в условиях отрицательных температур:

$$\gamma_{R,t} = -2 \cdot 10^{-5} T^2 - 0,0011 T + 1, \quad (12)$$

где  $T$  – температура конструкции ( $-196^\circ C \leq T \leq 0^\circ C$ ).

Модуль упругости арматуры рекомендуется определять по формуле:

$$E_{s,t} = \gamma_{E,t} E_s, \quad (13)$$

где  $\gamma_{E,t} = E_{s,t}/E_s$  – коэффициент относительного изменения модуля упругости арматуры в условиях отрицательных температур:

$$\gamma_{E,t} = -2,23 \cdot 10^{-6} T^2 - 0,001 T + 1, \quad (14)$$

$T$  – температура конструкции ( $-196^\circ C \leq T \leq 0^\circ C$ ).

$E_s$  – модуль упругости арматуры в нормальных условиях.

Временное сопротивление арматуры при растяжении рекомендуется определять по формуле:

$$\sigma_{e,t} = \gamma_{e,t} \sigma_e, \quad (15)$$

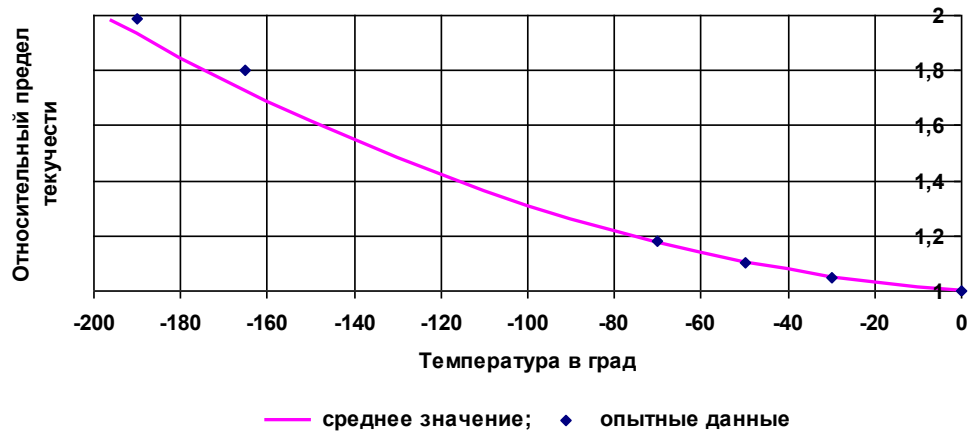
где  $\sigma_e$  – прочность арматуры в нормальных условиях,

$\gamma_{e,t} = \sigma_{e,t}/\sigma_e$  – коэффициент относительного изменения временного сопротивления арматуры в условиях отрицательных температур:

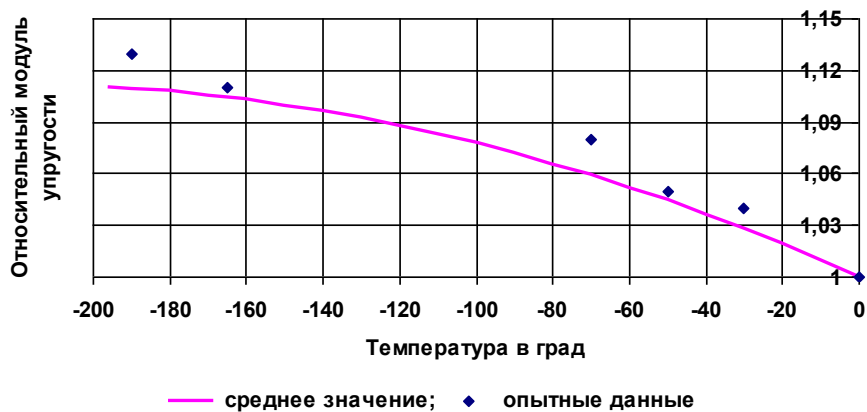
$$\gamma_{e,t} = -3,11 \cdot 10^{-6} T^2 - 0,00198 T + 1, \quad (16)$$

где  $T$  – температура конструкции ( $-196^\circ C \leq T \leq 0^\circ C$ ).

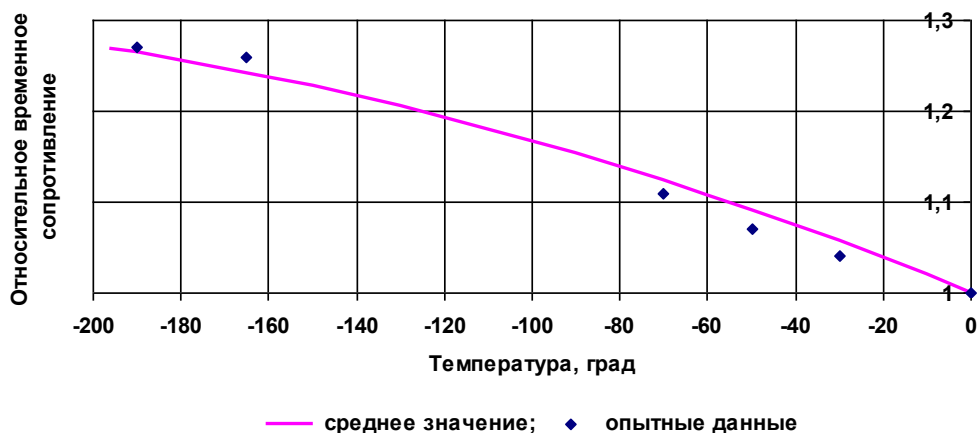
На рисунках 1,2,3 представлены результаты расчетов соответствующих характеристик арматуры класса A400 по приведенным формулам и опытным данным.



**Рис.1.** Относительное изменение предела текучести арматуры в зависимости от отрицательной температуры ( $\gamma_{st}$ )  
**Figure 1.** Relative change in the yield strength of reinforcement depending on the negative temperature ( $\gamma_{st}$ )



**Рис.2.** Относительное изменение модуля упругости арматуры в зависимости от отрицательной температуры ( $\gamma_{Et}$ )  
**Figure 2.** Relative change in the modulus of elasticity of the reinforcement depending on the negative temperature ( $\gamma_{Et}$ )



**Рис.3.** Относительное изменение временного сопротивления арматуры в зависимости от отрицательной температуры ( $\gamma_{\sigma t}$ )  
**Figure 3.** Relative change in the temporary resistance of reinforcement depending on the negative temperature ( $\gamma_{\sigma t}$ )

Из представленных результатов видно, что рассчитанные по формулам (10) - (16) характеристики арматуры имеют удовлетворительную сходимость с опытными данными.

Результаты исследований железобетонных образцов в виде зависимости средних деформаций арматуры от приложенной нагрузки приведены в таблице 5 и на рис.4.

Таблица 5

| Результаты исследований железобетонных призм |                         |                                             |                         |                                             |                         |                                             |
|----------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------|
| $T^0C$                                       | $N_{crc}^{exp}$ ,<br>кН | $\frac{N_{crc,T}^{exp}}{N_{crc,+15}^{exp}}$ | $N_{ult}^{exp}$ ,<br>кН | $\frac{N_{ult,T}^{exp}}{N_{ult,+15}^{exp}}$ | $a_{crc}^{exp}$ ,<br>мм | $\frac{a_{crc,T}^{exp}}{a_{crc,+15}^{cal}}$ |
| 15                                           | 36,0                    | 1,0                                         | 137,91                  | 1,0                                         | 0,10                    | 1,0                                         |
| -50                                          | 69,5                    | 1,93                                        | 152,88                  | 1,11                                        | 0,12                    | 1,2                                         |
| -70                                          | 79,5                    | 2,21                                        | 168,25                  | 1,22                                        | 0,21                    | 2,1                                         |
| -165                                         | 94,2                    | 2,62                                        | 255,32                  | 1,85                                        | -                       | -                                           |

Table 5

| Results of studies of reinforced concrete prisms |                         |                                             |                         |                                             |                         |                                             |
|--------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------|
| $T^0C$                                           | $N_{crc}^{exp}$ ,<br>kN | $\frac{N_{crc,T}^{exp}}{N_{crc,+15}^{exp}}$ | $N_{ult}^{exp}$ ,<br>kN | $\frac{N_{ult,T}^{exp}}{N_{ult,+15}^{exp}}$ | $a_{crc}^{exp}$ ,<br>mm | $\frac{a_{crc,T}^{exp}}{a_{crc,+15}^{cal}}$ |
| 15                                               | 36,0                    | 1,0                                         | 137,91                  | 1,0                                         | 0,10                    | 1,0                                         |
| -50                                              | 69,5                    | 1,93                                        | 152,88                  | 1,11                                        | 0,12                    | 1,2                                         |
| -70                                              | 79,5                    | 2,21                                        | 168,25                  | 1,22                                        | 0,21                    | 2,1                                         |
| -165                                             | 94,2                    | 2,62                                        | 255,32                  | 1,85                                        | -                       | -                                           |

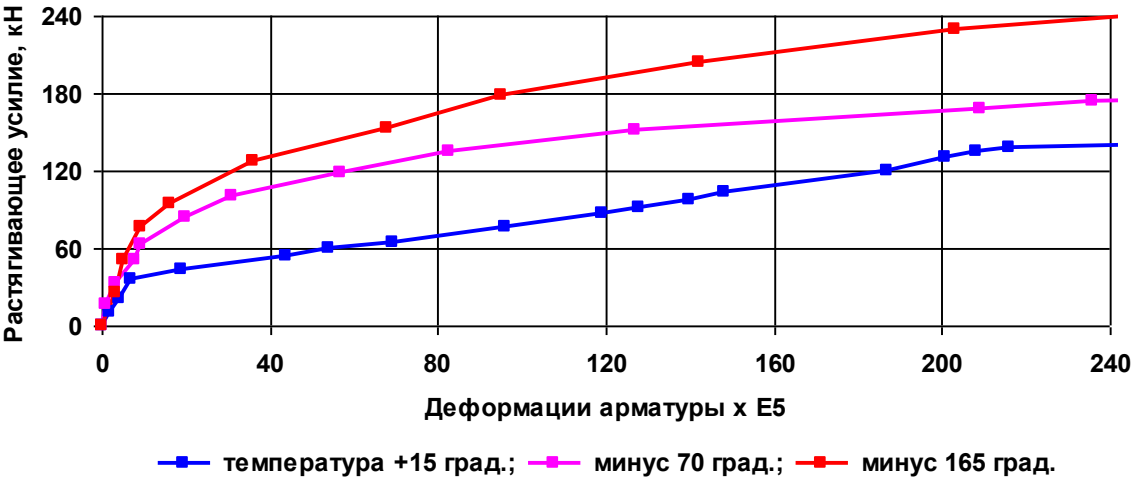


Рис.4. Средние деформации арматуры центрально-растянутых элементов  
Figure 4. Average deformations of reinforcement of centrally tensioned elements

Полученные данные опытов показывают, что температура замораживания и влажность бетона оказывают существенное влияние на напряженно-деформированное состояние центрально-растянутых железобетонных элементов. Понижение температуры до  $-70^{\circ}C$  и  $-165^{\circ}C$  соответственно приводит к увеличению усилия трещинообразования на 121% и 162%; прочности на 22% и 85%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных экспериментальных исследований предложены зависимости для прочностных и деформативных характеристик арматуры в зависимости от отрицательной температуры. При испытании железобетонных стержней на центральное растяжение установлено, что понижение температуры до  $-70^{\circ}C$  и  $-165^{\circ}C$  соответственно приводит к увеличению усилия трещинообразования на 121% и 162%; прочности на 22% и 85%. Это указывает на необходимость учета влияния отрицательных температур на деформативно-прочностные свойства бетона и арматуры при расчете железобетонных конструкций.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Ярмаковский В.Н., Ерофеев В.Т. О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций // *Academia. Архитектура и строительство*. 2015. №1. С.93-103.
2. Струлев В.М., Р.А. Яркин Р.А. О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций // *Вестник ТГТУ*. 2003, том 9. №2. С.277-281.
3. Гузеев Е.А., Пинус Б.И. Оценка надежности железобетонных конструкций при низких температурах // *Бетон и железобетон*. 1984. №10. С. 9-10.
4. Тамразян А.Г. Бетон и железобетон: проблемы и перспективы // *Промышленное и гражданское строительство*. 2014. № 8. С. 30-33.
5. Тамразян А.Г. Методология анализа и оценки надежности состояния и прогнозирование срока службы железобетонных конструкций // *Железобетонные конструкции*. 2023. № 1 (1). С. 5-18.
6. Карпенко Н.И., Ярмаковский В.Н., Карпенко С.Н., Кадиев Д. З. О построении диаграммного метода расчета стержневых железобетонных конструкций в условиях действия низких температур // *Известия вузов. Строительство*, –2018, –№6, –С. 5-17.
7. Слейдж Г. Работа стали при низких температурах // *Криогенный бетон*. М.: Стройиздат. – 1986. С.106-116.
8. Пинус Б.И., Пинус Ж.Н., Хомякова И.В. Изменение конструктивных свойств бетонов при охлаждении и замораживании // *Вестник ИрГТУ*. 2015. №2(97). С. 111-116.
9. Ярмаковский В.Н. Прочностные и деформативные характеристики бетона при отрицательных температурах. / *Бетон и железобетон*. 1971. №10. С.24-25.
10. Черных И.В. Влияние низких отрицательных температур на деформативно-прочностные свойства бетона // *Проблемы освоения и перспективы развития Южно-Якутского региона*. 2001.-С. 127-130.
11. Истомин А.Д., Александров Е.Н., Огурцова Л.П. Влияние способа водонасыщения бетона и отрицательной температуры на его деформативно-прочностные характеристики // *Наука и техника в дорожной отрасли*. 2018. №4. С. 40-42.
12. Элайсез М. Предварительно напряженный криогенный бетон. Обзор исследований, проведенных в Испании // *Криогенный бетон*. М.: Стройиздат. 1986. С.114-125.
13. Михайлов К.В., Милованов А.Ф., Самойленко В.Н. Учет влияния низкой температуры при расчете железобетонных изотермических резервуаров // *Криогенный бетон*. М.: Стройиздат. 1986. С.58-63.
14. Слышников С.О. Хладостойкая арматура для железобетонных конструкций // *Бетон и железобетон*. 2007. № 3. С.18-20.
15. Мулин Н.М., Мешков В.З. Области применения арматурной стали в конструкциях, эксплуатируемых при низких температурах // *Бетон и железобетон*. – 1977, № 1. С.18-20.
16. Мулин Н.М., Мешков В.З. О механических свойствах горячекатаных арматурных сталей при низких температурах. /*Проблемы прочности*. –1970, – №8, – С. 18-21.
17. Мулин Н.М. Стержневая арматура железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1974, 232 с.
18. Кугушин А.А. и др. Высокопрочная арматурная сталь. М.: Металлургия. 272 с.
19. Мадатян С.А. Арматура железобетонных конструкций. М.: Воентехлит. 2000. 256с.
20. Аояги Ю., Самойленко В.Н. Работа изгибаемых элементов при действии низких температур // *Бетон и железобетон*. 1982. №3. С. 19-20.
21. Горчаков Г.И., Гузеев Е.А., Сейланов Л.А. Совместное влияние нагрузки и отрицательной температуры на деформативность изгибаемых элементов // *Бетон и железобетон*. 1980. № 9. С. 7-9.
22. Попов В.М., Черных И.В. Пинус Б.И. Влияние замораживания на несущую способность изгибаемого железобетонного элемента // *Актуальные проблемы современной науки: Архитектура, строительство, транспорт*. Самара, 2003. С. 56-58.
23. Истомин А.Д., Кудрявцев А.В. Работа статически неопределимых железобетонных элементов в условиях отрицательных температур // *Промышленное и гражданское строительство*. 2016. №7. С.51-55.

## REFERENCES

1. Karpenko N.I., Karpenko S.N., Yarmakovskiy V.N., Erofeev V.T. On modern methods of ensuring the durability of reinforced concrete structures. *Academia. Architecture and construction*. 2015. No. 1. Pp. 93-103. (In Russ.).
2. Strulev V.M., R.A. Yarkin R.A. On modern methods of ensuring the durability of reinforced concrete structures. *Vestnik TSTU*. 2003, Volume 9. No. 2. Pp.277-281. (In Russ.).
3. Guzeev E.A., Pinus B.I. Evaluation of the reliability of reinforced concrete structures at low temperatures. *Beton i zhelezobeton*. 1984. No. 10. Pp. 9-10. (In Russ.).

4. Tamrazyan A.G. Concrete and reinforced concrete: problems and prospects. *Industrial and civil construction*. 2014. No. 8. Pp. 30-33. (In Russ.).
5. Tamrazian A.G. Methodology for the Analysis and Assessment of the Reliability of the State and Prediction the Service Life of Reinforced Concrete Structures. *Reinforced concrete structures*. 2023. 1(1). Pp. 5-18. (In Russ.)
6. N. I. Karpenko, V. N. Yarmakovskii, S. N. Karpenko, and D. Z. Kadiev, "On the construction of a diagram method for calculating reinforced concrete rod structures under conditions of low temperatures *News of universities. Construction*. 2018. No. 6. Pp. 5-17. (In Russ.).
7. Slage G. Work of steel at low temperatures. *Cryogenic concrete*. Moscow: Stroyizdat, 1986. Pp.106-116. (In Russ.)
8. Pinus B.I., Pinus Zh.N., Khomyakova I.V. Changes in the structural properties of concrete during cooling and freezing. *Bulletin of ISTU*. 2015. No. 2 (97). Pp. 111-116. (In Russ.).
9. Yarmakovskiy V.N. Strength and deformation characteristics of concrete at negative temperatures. *Concrete and reinforced concrete*. 1971. No. 10. Pp. 24-25. (In Russ.).
10. Chernykh I.V. Influence of low negative temperatures on the deformation-strength properties of concrete. Problems of development and prospects for the development of the South Yakutsk region. 2001. Pp. 127-130. (In Russ.).
11. Istomin A.D., Alexandrov E.N., Ogurtsova L.P. Influence of the method of water saturation of concrete and negative temperature on its deformation-strength characteristics. *Science and technology in the road industry*. 2018. No. 4. Pp. 40-42. (In Russ.).
12. Elisez M. Prestressed cryogenic concrete. Review of studies conducted in Spain. *Cryogenic concrete*. Moscow: Stroyizdat. 1986. P.114-125. (In Russ.).
13. Mikhailov K.V., Milovanov A.F., Samoylenko V.N. Accounting for the influence of low temperature in the calculation of reinforced concrete isothermal tanks. *Cryogenic concrete*. Moscow: Stroyizdat. 1986. Pp. 58-63. (In Russ.).
14. Slyshenkov S.O. Cold-resistant reinforcement for reinforced concrete structures. *Beton i zhelezobeton*. 2007. No. 3. Pp.18-20. (In Russ.).
15. Mulin N.M., Meshkov V.Z. Areas of application of reinforcing steel in structures operated at low temperatures. *Beton i zhelezobeton*. 1977. No. 1. Pp.18-20. (In Russ.).
16. Mulin N.M., Meshkov V.Z. On the mechanical properties of hot-rolled reinforcing steels at low temperatures. *Problems of strength*. 1970. No. 8. Pp. 18-21.
17. Mulin N.M. Bar reinforcement of reinforced concrete structures. Moscow: Stroyizdat, 1974. 232 p.
18. Kugushin A.A. et al. High-grade reinforcing steel. Moscow: Metallurgy. 272 p.
19. Madatyan S.A. Armature of reinforced concrete structures. Moscow: Voentehlit, 2000. 256 p.
20. Aoyagi Yu., Samoilenko V.N. The work of bending elements under the action of low temperatures // *Beton i zhelezobeton*. 1982. No. 3. Pp. 19-20.
21. Gorchakov G.I., Guzeev E.A., Seilanov L.A. Combined effect of load and negative temperature on the deformability of bending elements. *Beton i zhelezobeton*. 1980. No. 9. Pp. 7-9.
22. Popov V.M., Chernykh I.V. Pinus B.I. Influence of freezing on the bearing capacity of a bent reinforced concrete element. Actual problems of modern science: Architecture, construction, transport. Samara, 2003. Pp. 56-58.
23. Istomin A.D., Kudryavtsev A.V. Work of statically indeterminate reinforced concrete elements in conditions of negative temperatures. *Industrial and civil construction*. 2016. No. 7. Pp. 51-55