



УДК 69.07

DOI: 10.22227/2949-1622.2024.2.12-21

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/ RESEARCH ARTICLE

Оценка длительной прочности бетона в строительных конструкциях

В.И. Путляев¹, М.Н. Берлинова^{2*}

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация ² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Москва, Российская Федерация

* BerlinovaMN@mgsu.ru

Ключевые слова: длительная прочность бетона, критерий энергетического барьера, модуль деформаций бетона, энтропийный критерий прочности

История статьи

Поступила в редакцию: 09.04.2024

Доработана: 20.04.2024

Принята к публикации: 30.04.2024

Для цитирования

Путляев В.И., Берлинова М.Н. Оценка длительной прочности бетона в строительных конструкциях // Железобетонные конструкции. 2024. Т. 6. № 2. С. 12–21.

Аннотация. Предложен подход оценки длительной прочности бетона в строительных конструкциях при расчете железобетонных конструкций зданий и сооружений различного типа. Рассмотрен процесс увеличения начального модуля деформаций бетона во времени как следствие некоторой физико-химической реакции набора прочности. Представлена функция возраста бетона с учетом изменения режимов температурных воздействий в период твердения. Показано, что энтропийный критерий прочности более гибок по сравнению с критерием энергетического барьера разрушения. Применение энтропийного критерия прочности позволяет учесть влияние температуры на длительную прочность бетона.

Evaluation of the Long-Term Strength of Concrete in Building Structures

Valeriy I. Putlyaev¹, Marina N. Berlinova^{2*}

¹ Lomonosov Moscow State University (MGU), Moscow, Russian Federation

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russian Federation

* BerlinovaMN@mgsu.ru

Валерий Иванович Путляев, кандидат химических наук, доцент кафедры Междисциплинарного материаловедения, факультет Наук о материалах, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ), 119991, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1, стр.73 (лабораторный корпус Б); РИНЦ (AuthorID): 46039, Scopus: 6506886934, ResearcherID: R-4663-20216, ORCID: 0000-0001-7601-6787, E-mail: valeriy.putlyaev@gmail.com

Марина Николаевна Берлинова, кандидат технических наук, доцент, кафедра железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARYSPIN-код: 4923-4060, Scopus: 57192657313, ResearcherID: C-3590-2019, ORCID: 0000-0003-2150-3996, E-mail: marina.tvor@mail.ru

© Путляев В.И., Берлинова М.Н., 2024



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

Keywords: long-term strength of concrete, energy barrier criterion, concrete deformation modulus, entropy strength criterion

Article history

Received: 09.04.2024

Revised: 20.04.2024

Accepted: 30.04.2024

For citation

Putlyaev V.I., Berlinova M.N. Evaluation of the Long-Term Strength of Concrete in Building Structures. *Reinforced concrete structures*. 2024; 2(6):12–21.

Abstract. An approach to estimating the long-term strength of concrete in building structures in the calculation of reinforced concrete structures of buildings and structures of various types is proposed. The process of increasing the initial modulus of concrete deformations in time as a consequence of a certain physicochemical reaction of strength gain is considered. The function of the age of concrete is presented, taking into account the change in the modes of temperature effects during the period of hardening. It is shown that the entropy criterion of strength is more flexible compared to the criterion of the energy barrier of destruction. The application of the entropy strength criterion allows us to take into account the effect of temperature on the long-term strength of concrete.

ВВЕДЕНИЕ

Об изменении статической прочности бетона в современной науке существуют различные мнения. Известно, что с увеличением возраста бетонов статическая прочность увеличивается, когда характер и скорость нарастания прочности определяются различными причинами, например физико-химическими свойствами составляющих бетон компонентов, условиями набора прочности, типом напряженного состояния в момент времени нагружения, режимами приложения эксплуатационных нагрузок, климатическими условиями эксплуатации и многими другими факторами [1–5]. В большинстве случаев задачи прогнозирования напряженно-деформированного состояния конструкций рассматриваются в рамках механики деформируемого твердого тела.

В теории бетона принято деление понятия прочности бетона на кратковременную и длительную, которые имеют характерные различия. Долговечность бетона характеризуется его способностью длительное время выдерживать физические и химические воздействия окружающей среды без существенных изменений его структуры и физико-механических свойств.

В настоящее время нет единого мнения о величине предела длительной прочности бетона и влияющих на него факторов. Предел длительной прочности, по существу, определяется характером структурных дефектов, вызванных длительно действующей нагрузкой, т.е. под длительной прочностью (долговечностью) понимают напряжение, которое вызывает разрушение материала за данное время. Если эти дефекты не исчезают во времени — предел длительной прочности превзойден, если же они исчезают — образец может неограниченно долго сопротивляться действующим напряжениям [6].

Снижение длительной прочности связано с пластическим развитием во времени микротрещин; но есть другое мнение, что данный факт связан с преодолением в процессе деформирования некоторого энергетического барьера. Процесс деформирования и разрушения материалов, в частности бетона, можно описать в рамках подходов равновесной и неравновесной термодинамики.

Valery I. Putlyaev, Candidate of Sciences (Chemistry), Associate Professor of the Department of Interdisciplinary Materials Science, Faculty of Materials Sciences, Lomonosov Moscow State University (MSU), 119991, Moscow, Leninskie Gory st., 1, building 73 (laboratory building B); RSCI (AuthorID): 46039, Scopus: 6506886934, ResearcherID: R-4663-20216, ORCID: 0000-0001-7601-6787, E-mail: valery.putlayev@gmail.com

Marina N. Berlinova, 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,

Термодинамический подход, оценку механических свойств бетона и связь диаграммы деформирования бетона с режимом нагружения весьма желательно было бы объединить в единую математическую запись определяющих соотношений механического состояния с точки зрения единства теории.

Пользуясь прочностным критерием, в котором учитывается энергетический барьер деформирования, можно рассчитывать длительную прочность в зависимости от режима нагружения [7].

МЕТОД

В работе [8] разработана методика определения длительной прочности при учете ниспадающей ветви диаграммы бетона « $\sigma - \epsilon$ », основанная на том, что при заданных режимах нагружения, определенных граничных условиях и определяющих уравнениях механического состояния достаточно данных для решения рассматриваемых задач.

Бетон является композиционным материалом, в котором после схватывания в течение набора прочности и далее в процессе эксплуатации протекают гетерогенные химические реакции между продуктами и полупродуктами схватывания, а также между ними и окружающей атмосферой. Кроме того, поскольку бетон представляет собой капиллярно-пористое тело, необходимо учитывать процессы поглощения и удаления влаги. Общим для вышеупомянутых процессов является то, что протекают они в несколько стадий, включающих доставку реагирующих компонентов в зону реакции, собственно химическое взаимодействие и отвод продуктов реакции, происходящий обычно по диффузионному механизму [9, 10]. Считая, что старение бетона связано с развитием какого-либо из упомянутых физико-химических процессов, и зная кинетику этих процессов, можно вывести функцию старения (возраста) бетона в зависимости от времени и температуры.

Нагружаемое стареющее бетонное изделие (конструкция) с точки зрения термодинамики является открытой системой, эволюцию которой, вплоть до разрушения, естественно описать наиболее универсальным критерием — изменением энтропии. Энтропия, как обобщенная координата теплообмена, сопряженная с обобщенной силой — температурой, позволяет естественным образом ввести температурный фактор в описание любого состояния системы, в том числе и разрушения. Отсюда понятен интерес к энтропийному критерию прочности.

В настоящей работе предпринята попытка привлечь энтропийный критерий прочности для учета влияния температуры на длительную прочность бетона. При этом функция старения бетона введена на основе протекающей в нем модельной, термически активируемой химической реакции.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

С точки зрения термодинамики состояние разрушения, как и любое другое состояние системы, определяется фиксированным значением характеристических функций: энтропии S , внутренней энергии U , энтальпии H , свободной энергии Гиббса G и т.д. Совокупный процесс

разрушения не является самопроизвольным, поскольку требует совершения над системой внешней работы (деформирования) для достижения состояния разрушения.

Рассматривая процесс увеличения начального модуля деформаций бетона во времени как следствие некоторой физико-химической реакции твердения, было принято для случая постоянной температуры реакции выражение функции старения [11]:

$$\Omega(\tau) = 1 - e^{-\alpha\tau}, \quad (1)$$

где α — константа скорости химической реакции. Данное выражение формально соответствует кинетической зависимости для химической реакции 1-го порядка. Для реакций такого типа принимается, что скорость химической реакции твердения пропорциональна концентрации реагирующих веществ:

$$\frac{d(A_0 - A)}{d\tau} = \alpha(A_0 - A), \quad (2)$$

где A_0 — полная концентрация реагирующих веществ;

A — концентрация прореагировавших веществ в момент времени t . Константа скорости химической реакции α не зависит от концентрации, но зависит от температуры.

Эта зависимость выражается уравнением Аррениуса:

$$\alpha = a \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right), \quad (3)$$

где a — некоторая постоянная;

T — абсолютная температура реакции;

R — универсальная газовая постоянная;

E_A — энергия активации.

Подставив последнее выражение (3) в предыдущее (2) и разделив переменные, получим:

$$\frac{d(A_0 - A)}{A_0 - A} = a \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) d\tau. \quad (4)$$

После интегрирования получаем:

$$\ln(A_0 - A) = -\int_{t_0}^t \alpha d\tau + C. \quad (5)$$

При $\tau = t_0$ $A = 0$ и тогда $C = \ln A_0$,

Откуда:

$$\Omega(\tau) = A / A_0 = 1 - \exp\left(-\int_{t_0}^t \alpha d\tau\right)$$

и окончательно

$$\ln((A_0 - A) / A_0) = -\int_{t_0}^t \alpha d\tau, \quad (6)$$

где α вычисляется по (3).

Если принять, что характеристика скорости протекания реакции α зависит от температурно-временного фактора, тогда:

$$-\frac{d(A_0 - A)}{dt} = \int_0^{\tau} \alpha(T(\tau)) dt$$

$$\text{и } \ln(A_0 - A) = -\int_0^{\tau} \alpha(T(\tau)) dt + C. \quad (7)$$

Тогда функция старения бетона при изменении режимов температурных воздействий в период твердения будет иметь вид:

$$F_R(t) = 1 - e^{-\int_0^{\tau} \alpha[T(\tau)] dt}. \quad (8)$$

Разность энтропии для двух состояний системы равна (второй закон термодинамики)

$$S_2 - S_1 > \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \quad (9)$$

для необратимых процессов, так как процессы деформирования материалов (особенно бетона) термодинамически необратимы.

Понятия температуры и тензора напряжения (и др.) в случае стационарных неравновесных процессов получают естественное феноменологическое определение, поскольку эти параметры могут быть измерены обычными приборами.

Для необратимых процессов исходим из следующих предположений линейной необратимой термодинамики:

- справедлив принцип локального равновесия, т.е. предполагается, что локально для необратимых процессов остается справедливым второе начало термодинамики обратимых процессов;
- все термодинамические функции (внутренняя энергия, свободная энергия, энтропия и т.д.) не зависят от координат и времени, т.е. в каждом локальном объеме являются функциями тех же параметров, что и в случае равновесия;
- градиенты обобщенных сил в рассматриваемой системе (химического потенциала, температуры, механического напряжения и т.д.) достаточно малы;
- полное изменение энергии и энтропии аддитивно складывается из изменений этих функций в отдельных элементах системы.

Параметры процесса, т.е. величины, применяемые в уравнениях термодинамики, которые не могут быть определены состоянием системы, зависят от пути, приведшем систему в данное состояние.

Процесс деформирования реальных тел, таких как бетон, т.е. обладающих свойствами нелинейности и неравновесности, проходит по необратимому пути, поэтому σ и ε не могут одновременно служить параметрами состояния, так как являются функционалами, а не функцией, и сильно зависят от пути деформирования.

Стареющий бетон является сложной термодинамической системой с протекающими химическими реакциями твердения и массообменом с окружающей средой.

Под воздействием внешней нагрузки в объеме бетонного изделия возникает неоднородное напряженное состояние, что обусловлено, прежде всего, существенными различиями в механических свойствах элементов его структуры — матрицы и заполнителя. Молекулы воды мигрируют из микропор и структурных элементов цементного камня в микротрещины,

обеспечивая быстрое обезвоживание [12]. Помимо массообмена с окружающей средой, происходит и обмен энергии за счет теплоты реакций твердения, а также за счет изменения длин и разрыва химических связей (деформации и распространения микротрещин). Представленные соображения позволяют расценивать деформируемое стареющее бетонное изделие как открытую систему, в которой протекают неравновесные процессы, характеризующиеся существенным производством энтропии.

Развитие теории длительной прочности бетона может быть получено, таким образом, на основе энтропийного критерия прочности, который более экономичный в реализации и более точный за счет учета предистории нагружения по отношению к критериям, принятым в настоящее время (например, по сравнению с критерием энергетического барьера разрушения).

Если изменение температуры влияет на деформативные свойства бетона, то это должно быть учтено соответствующими записями для модуля упругости и меры ползучести.

При расчетах конструкций приходится иметь дело с материалами, которые к моменту нагружения уже имеют определенное начальное количество плотности энтропии S_0^* , определяемое их состоянием.

Приращение плотности энтропии ΔS^* с рассматриваемого момента времени и до момента разрушения обуславливается различными факторами: вязкими сопротивлениями, диффузионными, химическими процессами, необратимыми процессами образования микротрещин и т.д.

В соответствии с принятым критерием:

$$S_0 + \Delta S = S^* . \quad (10)$$

В пользу энтропийного критерия прочности свидетельствуют прямые и косвенные опыты различных ученых. Отмечено подобие процессов плавления и разрушения [13, 14]. Энтропия вещества перед его полным плавлением S^* может рассматриваться как константа материала. На основе этого был сформулирован энтропийный критерий прочности, определяющий, что разрушение происходит в тот момент времени, к которому в нем накопится некоторое предельное значение плотности энтропии S^* .

Исследования показывают, что при различных режимах и времени нагружения при постоянной температуре разрушение происходит при различных напряжениях и деформациях, постольку состояние бетона в момент разрушения при разных режимах различно [15]. Напряжения и деформации бетона в данном случае не являются функциями состояния и, следовательно, не определяют состояние разрушения.

Действительно, изменив режим нагружения, можно добиться разрушения бетона при других значениях напряжений σ и деформаций ε . Теперь становится понятным, что система потенциалов деформирования по необратимому пути должна отличаться от принятой в классической равновесной термодинамике.

Принимая постулат об инвариантности от режима нагружения количества энтропии, накопленной в образце при переводе его из начального напряженно-деформированного состояния в рассматриваемое конечное, запишем:

$$ds = \frac{1}{T} \delta Q + \delta S_n , \quad (11)$$

где δS_n — производство энтропии, вызванное необратимыми процессами, такими как вязкие сопротивления, химические реакции, диффузионные процессы, необратимые процессы образования трещин, пластические деформации и т.д. В рассматриваемой задаче производство энтропии обусловлено протеканием модельной химической реакции 1-го порядка и пластической деформацией бетона.

Для конечного процесса:

$$\Delta S(t) = \int_{t_0}^t \frac{\varepsilon_n(\tau) \sigma(\tau)}{T(\tau)} d\tau, \quad (12)$$

где ε_n — необратимые деформации, обуславливающие необратимость процесса, которые можно вычислить как разность полных и обратимых деформаций:

$$\varepsilon_n = \varepsilon - \varepsilon_{ob}. \quad (13)$$

Опираясь на диаграмму деформирования сжатого бетона и зная ее поведение при разгрузках, по формуле (12) можно построить зависимость:

$$\Delta S = \Delta S(\varepsilon, \sigma, T). \quad (14)$$

При изменении напряжений пропорционально t , с учетом энтропийного критерия прочности, напряжения в бетоне в текущий момент времени будут равны:

$$\begin{aligned} \sigma(\tau) &= \lambda R_{b,dl}(t) \text{ при } t_0 \leq \tau < t \\ \text{и } \sigma(\tau) &= R_{b,dl}(t) \text{ при } \tau = t, \end{aligned} \quad (15)$$

где $R_{b,dl}(t)$ — длительная прочность бетона;

λ — коэффициент, зависящий от инвариантов текущего напряженно-деформированного состояния бетона [16];

t_0 — возраст материала в момент начала нагружения;

τ — возраст бетона;

t — момент наблюдения деформаций.

При $t_0 \leq \tau < t$ будет справедлива запись деформации:

$$\varepsilon(t, t_0) = \frac{F_k(t_0)}{E_b(t)} + F_c(t_0) C^*(t, t_0), \quad (16)$$

где $F_k(t_0)$ — функция нелинейности для мгновенных деформаций; $F_c(t_0)$ — функция нелинейности запаздывающих деформаций, которые являются строго идентичными только в линейной постановке и равны напряжениям $\sigma(t_0)$, в нелинейной постановке они различны и будут давать одинаковые результаты только в том случае, если подбор функций нелинейности увязан с принятой формой записи меры простой ползучести; $E_b(t)$ — модуль упругости бетона в момент времени t ; $C^*(t, t_0)$ — мера ползучести бетона.

Примем, что при мгновенной разгрузке деформации следуют прямой линии, параллельной касательной к кривой « $\sigma - \varepsilon$ » в начале координат. Тогда обратимая часть деформации будет иметь запись:

$$\varepsilon_{ob}(t, t_0) = \frac{\sigma(t_0)}{E_b(t)} + k_{ob,c} \sigma(t_0) C^*(t, t_0), \quad (17)$$

где $k_{ob.c}$ — коэффициент обратимости деформаций ползучести.

В соответствии с (13), необратимые деформации будут равны:

$$\begin{aligned}\varepsilon_n(t, t_0) &= \frac{[F_k(t_0) - \sigma(t_0)]}{E_b(t_0)} + [F_c(t_0) - k_{ob.c}\sigma(t_0)]C^*(t, t_0) = \\ &= \frac{V_k}{E_b(t)} \left[\frac{\sigma(t_0)}{R_b(t_0)} \right]^{m_k} \sigma(t_0) + \left\{ 1 - k_{ob.c} + V_c \left[\frac{\sigma(t_0)}{R_b(t_0)} \right]^{m_c} \right\} \sigma(t_0) C^*(t, t_0),\end{aligned}\quad (18)$$

где $V_k = \frac{37,5}{R_b}$; $V_c = \frac{45,0}{R_b}$; $m_k = 5,7 - 0,05R_b$; $m_c = 5 - 0,07R_b$ — параметры нелинейности.

Мера ползучести принята в форме $C^*(t, t_0) = C(\infty, 28)(c + de^{-2\gamma\tau})[1 - ke^{-\gamma(t-\tau)}]$.

Функции нелинейности F_k и F_c подобраны с учетом записи [8]:

$$F = \sigma \left[1 + V \left(\frac{\sigma}{R_b} \right)^m \right]. \quad (19)$$

При кратковременном (эталонном) нагружении и постоянной температуре в момент разрушения:

$$\Delta S \times T = \varepsilon_{ob} R_b(t) - \int_0^{R_b} \varepsilon_{ob} d\sigma. \quad (20)$$

Учитывая (18), запишем:

$$\Delta S \times T = R_b^2(t) \left[\frac{V_k}{E_b(t)} \frac{m_k + 1}{m_k + 2} + \left(\frac{1 - k_{ob.c}}{2} + V_c \frac{m_c + 1}{m_c + 2} \right) C^*(t, t_0) \right]. \quad (21)$$

На диаграмме деформирования бетона при сжатии « $\sigma - \varepsilon$ » приращение плотности производства энтропии будет пропорционально площади частных приращений на различных участках. Общее приращение плотности производства энтропии будет равно сумме частных приращений. Исходя из условия (6), можно записать зависимость для определения длительной прочности с учетом возраста бетона:

$$R_b(\tau) = F_R(\tau) \beta_R \eta_R R_c, \quad (22)$$

где F_R — функция старения бетона; β_R — температурный коэффициент прочности; η_R — коэффициент длительности и режима загрузки; R_c — прочность бетона при некоторых условиях, принятых за средние.

Учитывая, что при эталонном режиме загрузки $\eta_R = 1$, на основании (22) имеем:

$$R_{b,dl}(t) = \eta_R R_b(t_0) \frac{F_R(t) \beta_R}{F_R(t_0) \beta_R} = r R_b(t_0), \quad (23)$$

где $r = \eta_R \frac{F_R(t) \beta_R}{F_R(t_0) \beta_R}$ — коэффициент изменения прочности бетона.

Тогда отношение величины энтропии к длительной прочности в момент разрушения бетона:

$$\frac{\Delta S \times T}{R_{b,dl}^2(t)} = \frac{V_k}{E_b(t)} \left[\beta^{m_k} \lambda^2 + \frac{m_k + 1}{m_k + 2} + (1 - \lambda^{m_k + 1}) \right] + (1 - k_{ob,c} + V_c \beta^{m_c}) \lambda^2 C^*(t, t_0) - \frac{1}{E_b(t_0)} \frac{V_k}{m_k + 2} \beta^{m_k} \lambda^2 -$$

$$- \left(\frac{1 - k_{ob,c}}{2} + \frac{V_c}{m_c + 2} \beta^{m_c} \right) \lambda^2 C^*(t, t_0) + \left[(1 - k_{ob,c}) \frac{(1 - \lambda)^2}{2} + V_c \eta_R^{m_c} \frac{m_c + 1 - \lambda^{m_c + 1} (m_c + 2) + \lambda^{m_c + 2}}{m_c + 2} \right] C^*(t, t_0),$$

где $\beta = \lambda r$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Суммируя изложенное выше, можно сделать следующие выводы:

1. Процесс увеличения начального модуля деформаций бетона во времени рассмотрен как следствие некоторой модельной физико-химической реакции твердения первого порядка. При этом принимается то, что скорость химической реакции твердения пропорциональна концентрации реагирующих веществ и зависит от температурно-временного фактора. Применение энтропийного критерия прочности позволяет учесть влияние температуры на длительную прочность бетона. Считая, что для бетонов законы ползучести установлены достаточно достоверно, можно рекомендовать применение энтропийного критерия для изучения сопротивления бетона в железобетонных конструкциях.

2. Изменчивость свойств бетонов зависит не только от возраста, но и от условий набора прочности, и прямо влияет на поведение железобетонных конструкций в реальных условиях эксплуатации. Более точная оценка реальных свойств железобетонных конструкций с учетом режима действия внешних нагрузок, изменения прочностных характеристик материалов, а также возможных коррозионных повреждений, позволит не только уточнить напряженно-деформированное состояние, но и выяснить характер его изменения в процессе нагружения и разгружения, также поможет изыскать дополнительные резервы прочности и обеспечить экономии материалов при длительных сроках эксплуатации зданий и сооружений различного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Green W., Chess P. Durability of Reinforced Concrete Structures. CRC Press, 2019.
2. Blikharsky Y., Selejdak J., Kopiika N., Vashkevych R. Study of Concrete under Combined Action of Aggressive Environment and Long-Term Loading // Materials. 2021. № 14 (21). P. 6612.
3. Тамразян А.Г., Орлова М.А. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных изгибаемых элементов с трещинами // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 6 (53). С. 98–105.
4. Tamrazyan A.G., Avetisyan L.A. Behavior of compressed reinforced concrete columns under thermodynamic influences taking into account increased concrete deformability // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. P. 052034
5. Berlinov M., Berlinova M. Long-term durability of concrete structures // Journal of Physics: Conference Series this link is disabled. 2020. № 1614 (1). P. 012006.
6. Бамбура А.Н., Дорогова Е.В. Общий метод оценки напряженно-деформированного состояния и несущей способности предварительно-напряженных железобетонных элементов круглого сечения по деформационной модели // Вестник Белорусско-российского университета. 2014. № 3 (44). С. 105–112.
7. Творогова М.Н. Сопротивление деформированию и разрушению железобетонных конструкций с учетом нелинейных и неравновесных свойств и режимов нагружения : дис. ... канд. техн. наук. М., 2006.
8. Бондаренко В.М., Бондаренко С.В. Инженерные методы нелинейной теории железобетона. М., 1982. 287 с.
9. Левченков С.И. Физическая и коллоидная химия : конспект лекций для студентов РГУ. Ростов-на-Дону, 2008. 87 с.
10. Putlyaev V.I., Safronova T.V., Filippov Ya.Yu., Evdokimov P.V. Colloidal forming of chemically bonded calcium phosphate composites // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. № 8 (1). Pp. 153–158.
11. Назаренко В.Г., Творогова М.Н. О построении функций старения бетона. Бетон и железобетон. 2010. № 6. С. 23–25.

12. Берлинова М.Н., Бобров В.В. Оценка влияния деструктивных процессов на длительную прочность бетона // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 6. С. 10–13.
13. Борн М. Лекции по атомной механике (пер. с нем.). 2011. 312 с.
14. Чудновский А.И. Основы статистической теории длительной прочности : уч. пос. для студентов IV–V курсов самолетостроит. фак-та дневного отд-ния. Новосибирск : НЭТИ, 1977. Ч. 1. 105 с.
15. Берлинова М.Н., Творогов А.В. Режимная прочность бетона в строительных конструкциях // Естественные и технические науки. 2015. № 6 (84). С. 530–532.
16. Бондаренко С.В. Расчет строительных конструкций по режимам нагружений. М. : МИСИ. БТИСМ, 1982. 180 с.

REFERENCES

1. Green W., Chess P. *Durability of Reinforced Concrete Structures*. CRC Press, 2019.
2. Blikharsky Y., Selejdak J., Kapiika N., Vashkevych R. Study of Concrete under Combined Action of Aggressive Environment and Long-Term Loading. *Materials*. 2021. No. 14 (21). P. 6612.
3. Tamrazyan A.G., Orlova M.A. Experimental Studies of the Stress-Strain State of Reinforced Concrete Bending Elements with Cracks. *Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2015. No. 6 (53). Pp. 98-105.
4. Tamrazyan A.G., Avetisyan L.A. Behavior of compressed reinforced concrete columns under thermodynamic influences taking into account increased concrete deformability. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 365. P. 052034.
5. Berlinov M., Berlinova M. Long-term durability of concrete structures. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. No. 1614 (1). P. 012006.
6. Bambura A.N., Dorogova E.V. General Method for Estimating the Stress-Strain State and Load-Bearing Capacity of Prestressed Reinforced Concrete Elements of a Circular Section by a Deformation Model. *Bulletin of the Belarusian-Russian University*. 2014. No. 3 (44). Pp. 105-112.
7. Tvorogova M.N. *Resistance to deformation and destruction of reinforced concrete structures taking into account nonlinear and nonequilibrium properties and loading regimes : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences*. Moscow, 2006.
8. Bondarenko V.M., Bondarenko S.V. *Engineering methods of nonlinear theory of reinforced concrete*. Moscow, 1982. 287 p.
9. Levchenkov S.I. *Physical and colloidal chemistry : lecture notes for students*. Rostov-on-Don : RSU, 2008. 87 p.
10. Putlyaev V.I. Safronova T.V., Filippov Ya.Yu., Evdokimov P.V. Colloidal forming of reaction-bound calcium phosphate composites. *Materials Science*. 2016. No. 6. Pp. 39-45.
11. Nazarenko V.G., Tvorogova M.N. *On the construction of concrete aging functions. Concrete and reinforced concrete*. 2010. No. 6. Pp. 23-25.
12. Berlinova M.N., Bobrov V.V. Evaluation of the influence of destructive processes on the long-term strength of concrete. *Industrial and civil construction*. 2014. No. 6. Pp. 10-13.
13. Born M. *Lectures on Atomic Mechanics (transl. from German)*. 2011. 312 p. (in Russian).
14. Chudnovsky A.I. *Fundamentals of statistical theory of long-term strength : handbook for students of IV-V courses of aircraft engineering. fac. day study*. Novosibirsk : NETI, 1977. Part 1. 105 p.
15. Berlinova M.N., Tvorogov A.V. Regime strength of concrete in building structures. *Natural and technical sciences*. 2015. No. 6 (84). Pp. 530-532.
16. Bondarenko S.V. *Calculation of building structures according to loading regimes*. Moscow : MISI, BTISM, 1982. 180 p.