СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И СООРУЖЕНИЙ
STRUCTURAL MECHANICS OF ENGINEERING CONSTRUCTIONS AND BUILDINGS

2024. 20(5). 441–452

ISSN 1815-5235 (Print), 2587-8700 (Online)

HTTP://JOURNALS.RUDN.RU/STRUCTURAL-MECHANICS

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ANALYSIS AND DESIGN OF BUILDING STRUCTURES

DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-5-441-452
УДК 69.07
EDN: CRDXOQ

Научная статья / Research article

Длительная эксплуатация железобетонной рамы на деформируемом грунтовом основании с учетом силовых и средовых воздействий

М.В. Берлинов

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, *Москва*, *Россия*
✉ berlinov2010@mail.ru

Поступила в редакцию: 22 августа 2024 г.
Принята к публикации: 13 октября 2024 г.

Аннотация. Исследована возможность расчетными методами еще на этапе проектирования конструктивных элементов различных сооружений из железобетона учитывать учесть длительность эксплуатации, нелинейность и реологию деформирования используемых материалов, а также принимать во внимание возможные коррозионные повреждения, что позволит определять размеры поперечных сечений и назначать требуемые классы бетона и арматуры. Рассматриваемый процесс длительного деформирования железобетона при изменяющемся режиме действия внешней нагрузки основан на методе интегральных оценок сопротивления деформированию, в основу которого положено использование интегрального модуля деформаций. Разработана методика расчета железобетонной рамы на грунтовом основании в агрессивной среде в условиях реологического деформирования, отражающая реальную работу конструктивных элементов при совместном воздействии факторов силового и несилового характера на основе современной феноменологической теории деформирования упруго ползучего тела. Представлена расчетная оценка длительной эксплуатации железобетонной рамы на грунтовом основании с учетом коррозионных повреждений. Приведен пример расчета железобетонной рамы здания на грунтовом основании при различных сроках эксплуатации и наличии коррозионных повреждений. Показано, что средовые повреждения железобетонных конструкций могут повлиять на прочность материала, изменить расчетные схемы, перераспределить усилия в сечениях конструкции, а также привести к другим последствиям, которые снижают проектные сроки эксплуатации зданий.

Ключевые слова: расчетная схема, строительные конструкции, коррозионные повреждения, эксплуатационные нагрузки, напряжения, деформации, реологические свойства, нелинейность, эксплуатация

Заявление о конфликте интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: *Берлинов М.В.* Длительная эксплуатация железобетонной рамы на деформируемом грунтовом основании с учетом силовых и средовых воздействий // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2024. Т. 20. № 5. С. 441–452. http://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-5-441-452

Берлинов Михаил Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры жилищно-коммунального комплекса, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Москва, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 3128-6652, ORCID: 0000-0002-9585-5460; e-mail: berlinov2010@mail.ru

© Берлинов М.В., 2024
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode

Long-Term Operation of Reinforced Concrete Frame on Deformable Soil Base Considering Loading and Exposure Conditions

Mikhail V. Berlinov

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), *Moscow, Russia*
✉ berlinov2010@mail.ru

Received: August 22, 2024
Accepted: October 13, 2024

Abstract. The possibility of using computational methods to take into account the service life, nonlinearity and rheology of deformation of the materials used and potential corrosion damage of various reinforced concrete structural elements already at the design stage, which will allow to determine cross-sectional dimensions and assign the required grades of concrete and reinforcement, is studied. The considered process of long-term deformation of reinforced concrete under varying external load conditions is based on the integral estimation method of deformation resistance, which relies on the use of integral deformation modulus. A method for calculating a reinforced concrete frame on a soil base in aggressive environment under the conditions of rheological deformation has been developed, which reflects the real operation of structural elements under the combined influence of force and non-force factors based on the modern phenomenological theory of deformation of an elastic creeping body. Long-term operation of a reinforced concrete frame on a soil base, taking into account corrosion damage, is evaluated. An example calculation of a reinforced concrete frame of a building on a soil base is given for various operation periods and the presence of corrosion damage. It is shown that damage due to exposure of reinforced concrete structures can affect the strength of the material, change the calculation models, redistribute stresses in the cross-sections of the structure and also lead to other consequences that reduce the design life of buildings.

Key words: design scheme, building structures, corrosion damage, service loads, stresses, deformations, rheological properties, nonlinearity, operation

Conflicts of interest. The author declares that there is no conflict of interest.

For citation: Berlinov M.V. Long-term operation of reinforced concrete frame on deformable soil base considering loading and exposure conditions. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings.* 2024;20(5):441–452. http://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-5-441-452

1. Введение

В несущих железобетонных конструкциях зданий и сооружений, работающих в интенсивном эксплуатационном режиме и при неблагоприятных воздействиях окружающей среды, проявляются процессы деградации, связанные с развитием коррозионных процессов в структуре используемых материалов, что значительно сокращает ожидаемые сроки их службы. Значительная часть эксплуатируемых зданий, сооружений и объектов инфраструктуры возведена более полувека назад и находится в изношенном состоянии. Вопросы надежности и долговечности таких зданий и сооружений имеют актуальное значение в современной строительной отрасли и находят отражение во многих работах современных ученых. В [1] обобщены и систематизированы состояние, теории и современные методы оценки силового сопротивления железобетона. Рассмотрены экспериментальные основы построения эффективных расчетных моделей деформирования и разрушения железобетонных конструкций. Большое внимание уделено практическим приложениям разработанных моделей к исследованиям различных типов конструкций. Авторы [2; 3] разработали методы расчета конструктивных элементов с заданным нормальным распределением и надежностью и несущей способностью.

Достаточно большое количество эксплуатируемых зданий и сооружений имеют рамную конструкцию, выполненную из сборного или монолитного железобетона, множество научных работ посвящены таким конструкциям. В [4–6] представлены результаты исследований долговечности железобетонных конструкций, вероятностной оптимизации несущей способности и надежности статически неопределенных сложных конструкций, определено время динамического воздействия на элементы железобетонной рамы при потере устойчивости колонны.

Mikhail V. Berlinov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 3128-6652, ORCID: 0000-0002-9585-5460; e-mail: berlinov2010@mail.ru

В условиях длительной эксплуатации железобетонных конструкций необходимо оценить их напряженно-деформированное состояние в результате повреждения коррозией, определить надежность, долговечность и остаточный ресурс при эксплуатации, учитывая уменьшение площади поперечного сечения бетона и арматуры. В [7] представлены определяющие уравнения для математической теории процессов коррозии бетона. Самый неблагоприятный результат развития процесса коррозии железобетонных конструкций — это снижение их несущей способности и пригодности к нормальной эксплуатации, что приводит к несоблюдению требований по безопасности и предельным состояниям при действующих нагрузках в течение всего периода эксплуатации.

Вопросы эксплуатационной долговечности железобетонных конструкций с учетом коррозионных воздействий исследованы и публикованы авторами [8–13]. Нелинейность, реология деформирования и коррозионные повреждения железобетонных элементов могут повлиять на прочность материала, изменить схемы расчетов, перераспределить усилия в сечениях конструкции и нарушить совместную работу бетона с арматурой, а также привести к другим последствиям, которые снижают проектные сроки функционирования сооружений и другие эксплуатационные характеристики. Так, например, в [14] представлен практический расчет силового сопротивления сжатых железобетонных стержней, поврежденных коррозией.

В [15; 16] представлены исследования бетона при совместном действии агрессивной среды и длительном нагружении. В [17] приведены результаты контроля скорости коррозии в лаборатории и на месте. В [18] исследованы химические причины деградации бетона. Более детально исследованы химические, микробиологические и натурные методы испытаний на биогенную сернокислотную коррозию бетона [19]. Исследовано и представлено влияние коррозии на поведение железобетонных балок в [20].

В [21; 22] представлен анализ устойчивости железобетонной колонны при горизонтальных ударных воздействиях без учета факторов несилового характера, рассмотрены перспективы развития железобетонных конструкций из высокопрочных бетонов, высокая плотность которых имеет свойство замедлять развитие коррозии бетона.

При эксплуатации строительных конструкций зданий и сооружений и других элементов городской инфраструктуры на грунтовом основании, выполненных из бетона и железобетона, возникает большое количество различных эксплуатационных дефектов и повреждений, обусловленных как длительным действием внешних нагрузок, так и агрессивным (несиловым) воздействием внешней среды.

В реальных эксплуатационных условиях фундамент под стойку рамы опирается на грунтовое основание, которое имеет некоторую конечную величину податливости и не обладает абсолютной жесткостью, что не всегда учитывается существующими методами расчета.

Экспериментальные данные о деформировании бетона и грунтов основания свидетельствуют о наличии реологических свойств и нелинейной зависимости между напряжениями и деформациями, а также не все методы учитывают средовые воздействия при длительной эксплуатации.

В большинстве работ исследователей не учитывается совместное воздействие факторов силового и несилового происхождения. Силовые воздействия — это внешние нагрузки, инерционные силы; несиловые воздействия — изменение влажности, температуры, среды и т.д. Соответственно процессы деградации материалов, развитие деформации и являются следствием этих воздействий. Наиболее близко к решению этой задачи подошел автор [23; 24], предложив использовать в практических расчетах метод интегральных оценок, основанный на применении интегрального модуля деформаций.

С учетом вышесказанного в данной научной статье рассматривается построение более совершенного и экономичного метода расчета рамных конструкций.

2. Методы

Для исследования длительного деформирования железобетона в рамных конструкциях зданий и сооружений применяется метод интегральных оценок сопротивления деформированию при изменяющемся режиме действия внешней нагрузки. В основу метода интегральных оценок положено использование интегрального модуля деформаций [23].

Бетон, арматура и железобетон, как и другие строительные материалы, деформируются неравновесно и нелинейно. Это значит, что их деформации развиваются даже после стабилизации воздействий, вызывающих деформирование, а связь между величинами деформаций и воздействий, непропорциональна, нелинейна. Соотношения, описывающие связь между воздействиями, деформациями и временем — уравнения механического состояния материалов, которые представляют собой нелинейные интегральные уравнения. Нелинейные и неравновесные связи между напряжениями и деформациями материала учитываются для каждого обследуемого участка по высоте сечения единым интегральным модулем деформации, зависящим от уровня и истории силового загружения, а также характера и интенсивности воздействия среды.

Нелинейность и неравновесность деформирования будем учитывать с помощью метода интегральных оценок, базирующегося на феноменологической теории деформирования упруго-ползучего тела. Данный метод предусматривает зависимость жесткостных характеристик железобетонного сечения от уровня напряженного состояния.

3. Результаты и обсуждение

В качестве иллюстрации представленного метода рассмотрим расчет монолитной железобетонной рамы (рис. 1). В предположении об упругой работе материалов расчетную схему выберем таким образом, чтобы получить возможность учесть податливость грунтового основания (рис. 2). Для основной системы, показанной на рис. 3 (пронумерованы участки переменной жесткости), запишем разрешающие уравнения комбинированного метода расчета статически неопределимых систем:

$$\{\delta\}\{x\}+\{\Delta p\}=0, \tag{1}$$

где: δ — перемещение в направлении устраненных связей или перемещение от единичных перемещений наложенных связей; x — искомые неизвестные; Δp — грузовые члены.

Единичные перемещения по направлению искомых неизвестных в основной системе в устраненных связях между рамой и основанием складываются из двух составляющих: перемещения от осадки основания и изгиба балки определяются по методике, изложенной автором[1]:

$$\delta_{ik}=\frac{1-\mu_0^2}{E^e(v,t)\pi C}F_{ki}+\int_0^l\frac{M_iM_k}{D}dv, \tag{2}$$

где: μ_0 — коэффициент Пуассона грунта основания; F_{ki} — функция осадки основания; M_iM_k — моменты от единичных сил; $E^e(v,t)$ — переменный (касательный) модуль деформаций, зависящий от напряженного состояния грунта и бетона, параметров нелинейности, ползучести и старения материала балки и основания:

$$\frac{1}{E^e(v,t)}=\frac{d}{d\sigma}S\left[\frac{\sigma(t)}{E_0(t)}+\int_{t_0}^{t}\sigma(\tau)\frac{\partial}{\partial\tau}c(t,\tau)d\tau\right], \tag{3}$$

здесь: $E_0(t)$ — мгновенный модуль упругих деформаций материалов грунта и фундамента; $c(t,\tau)$ — мера ползучести; S — функция нелинейности деформирования:

$$S=1+\eta\left[\frac{\sigma(t)}{R(t)}\right]^m, \tag{4}$$

[1] *Берлинов М.В.* Основания и фундаменты: учебник. СПб.: Лань, 2019. 318 с.

где η и m — параметры нелинейности деформирования, определяемые из экспериментальных данных; $R(t)$ — прочность бетона и грунта в рассматриваемый временной интервал.

$D(t)$ — интегральная жесткость железобетонного сечения:

$$D(t)=E^{e}(v,t)\left[\frac{K_{\mathrm{b}}(z,t)bX^{3}}{12}+bx\left(q_{0}-\frac{X}{2}\right)^{2}\right]+E_{\mathrm{a}}^{'}\omega_{\mathrm{s}}(t)A_{\mathrm{a}}^{'}(q_{0}-a^{'})^{2}+\frac{E_{\mathrm{a}}\omega_{\mathrm{s}}(t)A_{\mathrm{a}}}{\psi_{\mathrm{a}}}(h_{0}-q_{0})^{2}, \quad (5)$$

здесь: $E^{\mathrm{e}}(v,t)$ — интегральный модуль деформаций, учитывающий нелинейность деформирования материалов бетона и грунтового основания; h_0 и q_0 — соответственно расстояние от центра тяжести растянутой арматуры и центра тяжести приведенного поперечного сечения до зоны сжатия; E_a, $E^1{}_a$ — модули упругости растянутой и сжатой арматуры; A_a, $A^1{}_a$ — площади растянутой и сжатой арматуры; x — высота сжатой зоны бетонного сечения; $K_b(z,t)$ — коэффициент, учитывающий степень коррозионных повреждений бетона, изменяющийся с течением времени наблюдения в соответствии с характером зон повреждения элемента (рис. 4; 5); $\omega_{\mathrm{s}}(t)$ — аналогичный коэффициент для учета коррозионных повреждений арматуры; ψ_{a} — коэффициент, учитывающий влияние сцепления арматуры и растянутого бетона на участках между трещинами.

Для участков балки, работающих без трещин, жесткость по Государственному своду правил Российской Федерации СП 63.13330.2018[2] необходимо принимать в следующем виде:

$$D(t)=E^{\mathrm{e}}(v,t)I_{red}, \quad (6)$$

где I_{red} — момент инерции приведенного поперечного сечения относительно его центра тяжести, определяемый с учетом отсутствия трещин.

Следует учитывать, что для определения перемещений в направлении устраненных связей в зонах рамы, не связанных с основанием в формуле (2), будет присутствовать только второе слагаемое, а первое — равно нулю. Перемещения от единичных перемещений наложенных связей легко определяются геометрически. Нелинейность и неравновесность деформирования грунтового основания может быть учтена аналогичным образом, для чего во втором слагаемом формулы (2) необходимо положить $E_0=E^{\mathrm{e}}(v,t)$, но параметры нелинейности деформирования следует принимать для грунта.

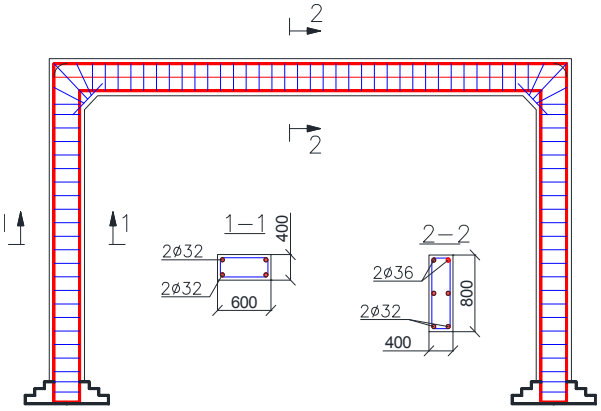

Рис. 1. Конструктивная схема рамы
И с т о ч н и к: выполнено М.В. Берлиновым
Figure 1. Structural design of the frame
S o u r c e: made by M.V. Berlinov

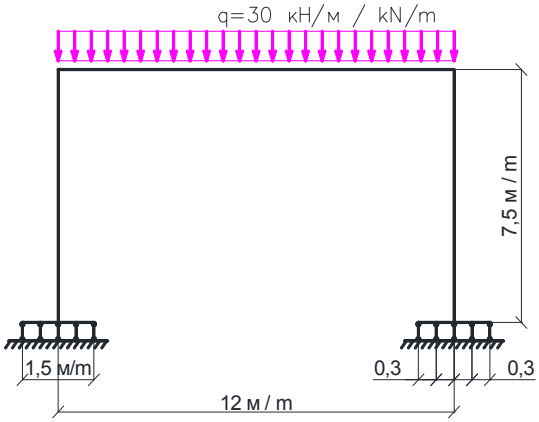

Рис. 2. Расчетная схема рамы
И с т о ч н и к: выполнено М.В. Берлиновым
Figure 2. Calculation model of the frame
S o u r c e: made by M.V. Berlinov

[2] СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2019. 118 с.

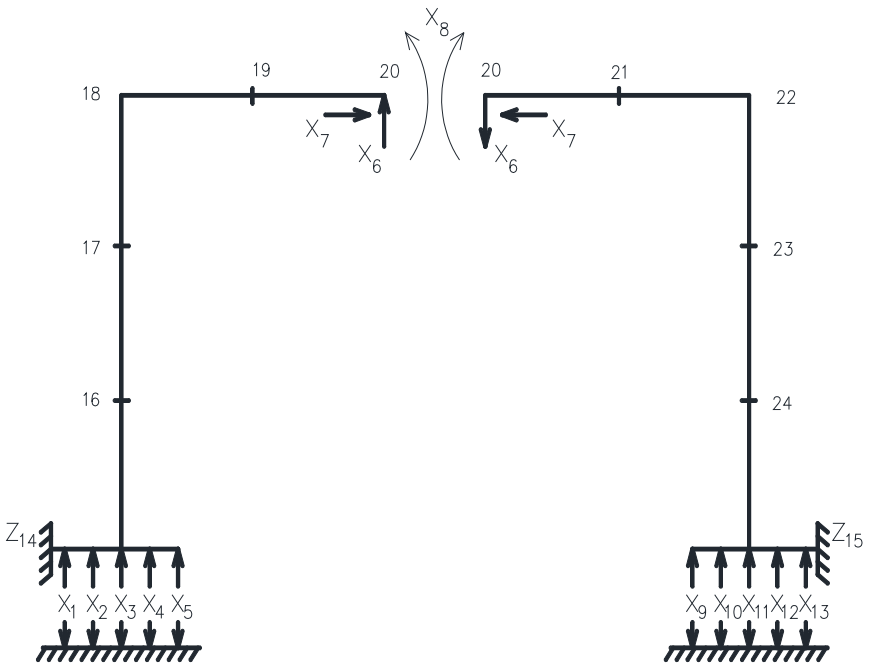

Рис. 3. Основная система: пронумерованы участки переменной жесткости
И с т о ч н и к : выполнено М.В. Берлиновым

Figure 3. Primary system: sections of variable rigidity are numbered
S o u r c e : made by M.V. Berlinov

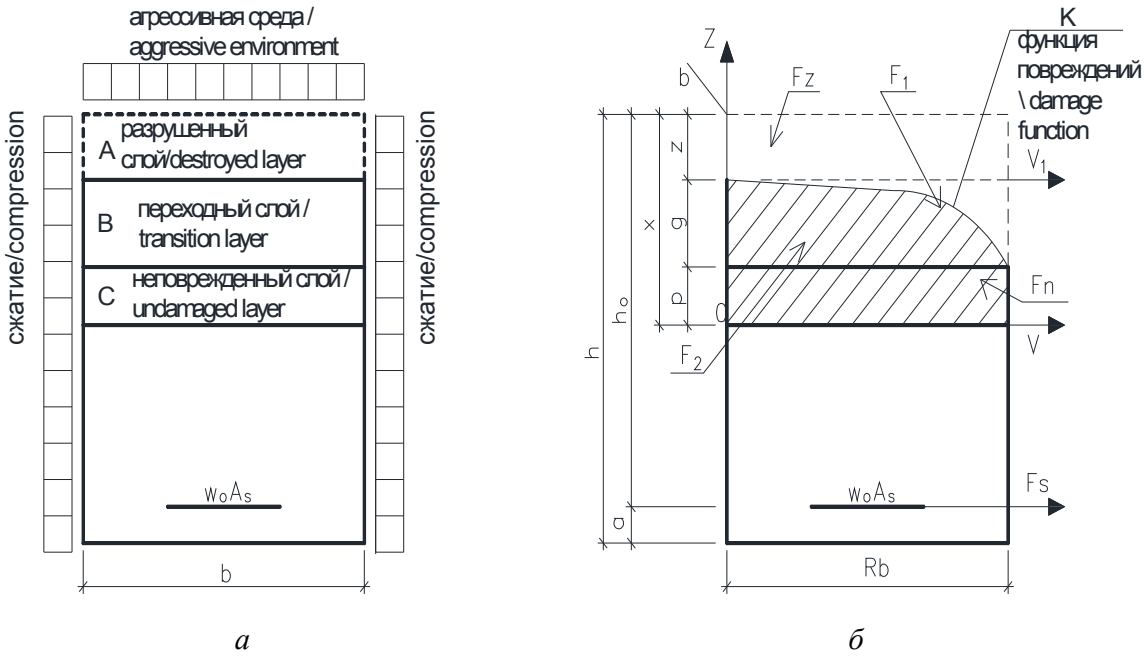

Рис. 4. Схема напряженного состояния:
а — нормального поперечного сечения; *б* — поврежденного коррозией железобетонного элемента
И с т о ч н и к : выполнено М.В. Берлиновым

Figure 4. Diagram of the stress state:
а — normal cross-section; *б* — reinforced concrete element damaged by corrosion
S o u r c e : made by M.V. Berlinov

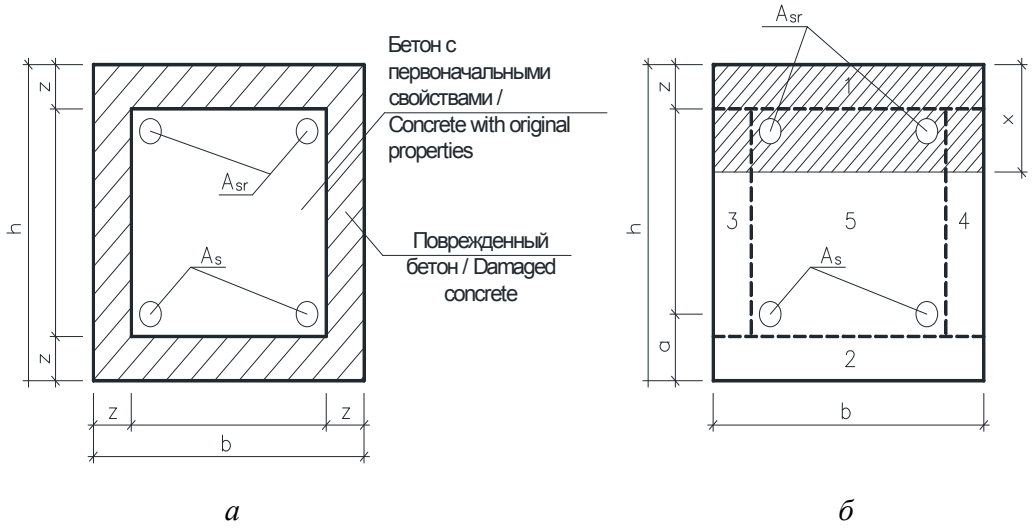

Рис. 5. Повреждение железобетонного элемента:
а — по всему периметру сечения; *б* — *1*, *2*, *3*, *4* — коррозионно-поврежденные зоны,
5 — неповрежденная зона
И с т о ч н и к: выполнено М.В. Берлиновым

Figure 5. Damage of the reinforced concrete element:
a — along the entire perimeter of the section; *б* — *1*, *2*, *3*, *4* — corrosion–damaged zones;
5 — undamaged zone
S o u r c e: made by M.V. Berlinov

Введем обозначения:

$$D = E^{e}\left(v,t\right)A + B, \tag{7}$$

где

$$A = \left[\frac{K_b\left(z,t\right)bX^3}{12} + bx\left(q_0 - \frac{X}{2}\right)^2\right];\;\; B = E_{\text{a}}^{'}\omega_{\text{s}}\left(t\right)A_{\text{a}}^{'}\left(q_0 - a^{'}\right)^2 + \frac{E_{\text{a}}\omega_{\text{s}}\left(t\right)A_{\text{a}}}{\psi_{\text{a}}}\left(h_0 - q_0\right)^2. \tag{8}$$

Тогда совместное рассмотрение выражений (1), (2), (3),(5) и (8) приводит к нелинейной системе интегрально-дифференциальных уравнений:

$$\left\{\int_0^l \frac{\bar{M}_i\bar{M}_k \dfrac{d}{d\sigma}S\left[\dfrac{\sigma(t)}{E_0(t)} + \int_{t_0}^{t}\sigma(\tau)\dfrac{\partial}{\partial\tau}c(t,\tau)d\tau\right]}{A + B\dfrac{d}{d\sigma}S\left[\dfrac{\sigma(t)}{E_0(t)} + \int_{t_0}^{t}\sigma(\tau)\dfrac{\partial}{\partial\tau}c(t,\tau)d\tau\right]}dv + \right.$$

$$\left. + \frac{\left(1-\mu_0^2\right)}{\pi}\frac{d}{dp}S\left[\frac{p(t)}{E_0(t)} + \int_{t_0}^{t}\sigma(\tau)\frac{\partial}{\partial\tau}c(t,t_0)d\tau\right]\int_0^{\alpha}\frac{p(v)}{x-v}dv\right\}\{x\} + \tag{9}$$

$$+\left\{\int_0^i \frac{\bar{M}_i\bar{M}_p \dfrac{d}{d\sigma}S\left[\dfrac{\sigma(t)}{E_0(t)} + \int_{t_0}^{t}\sigma(\tau)\dfrac{\partial}{\partial\tau}c(\tau,t)d\tau\right]}{A + B\dfrac{d}{d\sigma}S\left[\dfrac{\sigma(t)}{E_0(t)} + \int_{t_0}^{t}\sigma(\tau)\dfrac{\partial}{\partial\tau}c(t,\tau)d\tau\right]}dv\right\} = 0.$$

Решение системы уравнений в замкнутом виде встречает непреодолимые математические трудности. Однако получение решения осуществимо с помощью применения метода последовательных приближений, заключающегося в последовательном уточнении напряженно-деформированного состояния, начиная с упругого решения. Для определенного момента времени наблюдения на каждом этапе вычислений процессы коррозии и ползучести считаются условно фиксированными, что позволяет использовать известный аппарат линейной строительной механики. Такой подход существенно упрощает уравнение (9), которое приобретает следующий вид:

$$\left\{\int_0^l \frac{\bar{M}_i\bar{M}_k\left[1+(1+m)\eta\left(\frac{\sigma}{R}\right)^m\right]\left\langle\frac{1}{E_0}+c(t,t_0)\right\rangle}{+B\left[1+(1+m)\eta\left(\frac{\sigma}{R}\right)^m\right]\left\langle\frac{1}{E_0}+c(t,t_0)\right\rangle}dv+\right.$$
$$\left.+\frac{1-\mu_0^2}{\pi}\left[1+(1+m)\eta\left(\frac{\sigma}{R}\right)^m\right]\left\langle\frac{1}{E_0}+c(t,t_0)\right\rangle\int_0^\alpha\frac{p(v)}{x-v}dv\right\}\{x\}+$$
$$+\left\{\int_0^l\frac{\bar{M}_i\bar{M}_p\left[1+(1+m)\eta\left(\frac{\sigma}{R}\right)^m\right]\left\langle\frac{1}{E_0}+c(t,t_0)\right\rangle}{A+B\left[1+(1+m)\eta\left(\frac{\sigma}{R}\right)^m\right]\left\langle\frac{1}{E_0}+c(t,t_0)\right\rangle}\right\}dv=0. \quad (10)$$

Изменение внешней нагрузки, характерное для здания во время эксплуатации, примем по закону, показанному на рис. 6.

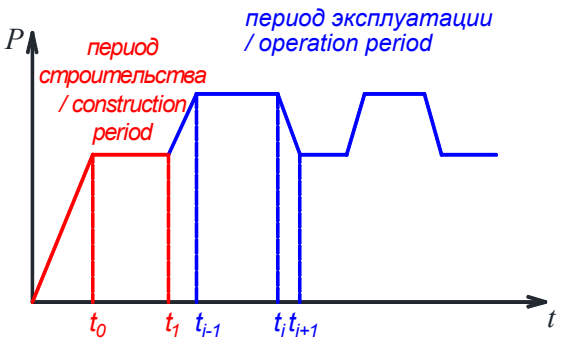

Рис. 6. График изменения внешней нагрузки
И с т о ч н и к: выполнено М.В. Берлиновым

Figure 6. Graph of external load changes
S o u r c e: made by M.V. Berlinov

$$P(t)=\begin{cases}\alpha_i tP_i;\ 0\leqslant t\leqslant t_0;\ t_{i-1}<t\le t_i\\ P_i;\ t_0<t\le t_{i-1}\\ -\alpha_i tP_i;\ t_i<t\le t_{i+1}\end{cases}. \quad (11)$$

Заметим, что график, приведенный на рис. 6, является несколько идеализированным, однако реальное изменение внешней нагрузки может быть уточнено с помощью вероятностных методов, применяемых в современной строительной механике.

В качестве иллюстрации изложенного метода расчета приведен пример расчета железобетонной рамы здания производственного назначения. Эпюры изгибающих моментов при различных сроках

эксплуатации показаны на рис. 7. Рама изготовлена из бетона класса В30, арматура класса А400. Грунт основания — суглинок, имеющий следующие физико-механические характеристики: $E_0(t)$ = 20 МПа, R = 0,25 МПа, η = 1,29; m = 2,48; ν = 0,3; $c(t,t_0)$ = 0,00278 $\frac{1}{\text{МПа}}$; γ = 0,025 $\frac{1}{\text{час}}$. Ширина стойки балки b = 40 см, высота h = 60 см; ширина ригеля балки b = 40 см, высота h = 80 см.

Параметры изменения внешней нагрузки α = 0,0007, t = 60 дней, P = 30 кН/м; коэффициенты коррозионных повреждений бетона и арматуры в начале эксплуатационного периода имеют нулевые значения. Рассматривался процесс сульфатной коррозии, толщина защитного слоя бетона a = 30 мм. Расчет с некоторыми упрощениями проведен только для периодов 10 и 50 лет эксплуатации сооружения (рис. 7).

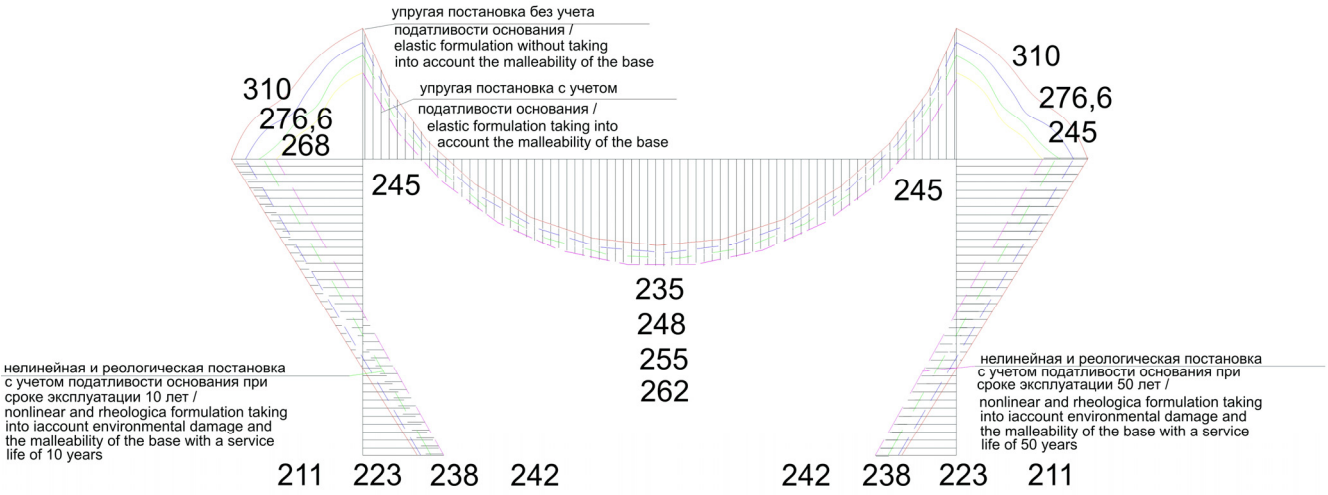

Рис. 7. Эпюры моментов, КНм
——— – упругая постановка задачи без учета податливости основания;
- - - - – упругая постановка с учетом податливости основания;
–·–·– – нелинейная и реологическая постановка с учетом средовых повреждений и податливости основания при сроке эксплуатации 10 лет;
– – ·– – ·– – ·– – – – – упругая постановка задачи с учетом податливости основания
И с т о ч н и к: выполнено М.В. Берлиновым

Figure 7. Moment diagrams, kNm
——— – elastic setting without taking into account the flexibility of the base;
- - - - – elastic setting taking into account the flexibility of the base;
–·–·– – nonlinear and rheological setting taking into account exposure damage and the flexibility of the base as a result of 10-year service;
– – ·– – ·– – ·– – – – – the same, as a result of 50-year service
S o u r c e: made by M.V. Berlinov

Упругая постановка с учетом податливости основания приводит к уменьшению максимальной ординаты эпюры моментов и увеличению минимальной, для ригеля рамы соответственно на 11 и 6 %, для стойки — 11 и 12 %.

В условиях нелинейной и неравновесной постановки задачи с учетом режима действия внешней нагрузки, податливости основания и коррозионных повреждений при сроке эксплуатации 10 лет уменьшение максимальной ординаты эпюры моментов для ригеля рамы составило 14 % , а увеличение минимальной — 10 %, для стойки соответственно — 14 и 13 % .

При нелинейной и неравновесной постановки задачи с учетом режима действия внешней нагрузки, податливости основания и коррозионных повреждений при сроке эксплуатации 50 лет уменьшение максимальной ординаты эпюры моментов для ригеля рамы составило соответственно 21 %, а увеличение минимальной — 14 %, для стойки — 21 и 15 % .

4. Заключение

Учет нелинейности, реологии деформирования и коррозионных повреждений при режимном изменении внешней нагрузки в процессе эксплуатации приводит к трансформации эпюр изгибающих моментов в сторону выравнивания усилий, что объясняется характерным для грунтов основания и железобетонных конструкций явлением перераспределения усилий с более нагруженных участков и компонентов сечений на менее нагруженные.

Использование метода интегральных оценок позволяет при совместном рассмотрении уравнений (1–5) и (7–10) получить инженерно-обозримое решение, превратить нелинейную задачу смешанного метода в линейную. Сущность такого приема заключается в том, что весь процесс загружения дискретизируется во времени на определенные (достаточно малые) интервалы, определяемые требуемой точностью расчета, для которых процессы коррозии и ползучести являются фиксированными.

В каждом временном интервале решение нелинейной задачи для постоянной нагрузки проводится с помощью линейного аппарата строительной механики на основе метода последовательных приближений. Конструкция разбивается на определенное количество участков, также определяемое требуемой точностью расчета, и в первом приближении задача решается в упруго-линейной постановке.

Во втором приближении по полученным значениям изгибающих моментов для каждого участка рамы уточняются жесткости железобетонного сечения по методике, изложенной в Государственном своде правил Российской Федерации СП 63.13330.2018[3], а по эпюре отпора грунта и эпюре касательных напряжений назначаются значения функций S, ν и E^{e} для бетона рамы и грунтового основания, т.е. уточняются значения единичных перемещений по формуле (9) и вновь производится решение задачи.

Затем проводят третье приближение и т.д. до тех пор, пока разница между двумя соседними значениями δ не достигнет заранее заданной степени точности. В случае возникновения расходящегося итерационного процесса применяется известный математический метод редукционных коэффициентов, улучшающий сходимость. Потом переходят к следующему фиксированному интервалу времени, для которого внешняя нагрузка изменится на некоторую величину, и вышеупомянутый вычислительный процесс повторяют снова и т.д. до тех пор, пока весь рассматриваемый временной интервал не будет исчерпан.

Представленный метод учета реальных свойств грунтов оснований и железобетонных конструкций фундаментов с учетом режима действия внешних нагрузок и коррозионных повреждений позволяет не только уточнить напряженно-деформированное состояние, но и выяснить характер его изменения в процессе нагружения и разгружения, что поможет изыскать дополнительные резервы прочности и обеспечить экономию материалов при длительных сроках эксплуатации зданий и сооружений различного назначения.

Следует заметить, что рассмотренная в примере сульфатная коррозия не ограничивает использование предлагаемой методики расчета, так как предлагаемый расчетный аппарат позволяет использовать и другие виды коррозии. Разница будет заключаться лишь в том, что при назначении коэффициентов коррозионных повреждений бетона и арматуры необходимо будет использовать другие функциональные зависимости, отражающие тот или иной тип коррозии.

Список литературы

1. *Бондаренко В.М., Колчунов В.И.* Расчетные модели силового сопротивления железобетона. М.: АСВ, 2004. 471 с. EDN: QNKPAP

2. *Тамразян А.Г.* Расчет конструктивных элементов с заданным нормальным распределением и надежностью и несущей способностью // Вестник МГСУ. 2012. № 10. С. 109–115. EDN: PDUBKP

[3] СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2019. 118 с.

3. *Tamrazyan A., Avetisyan L.* Comparative analisis of analytical and experimental results of the strength of compressed reinforced concrete columns under special combinations of loads // MATEC Web of Conferences. 5th International Scientific Conference on Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education, IPICSE 2016. 2016. Vol. 86. Article no. 01029. http://doi.org/10.1051/matecconf/20168601029

4. *Kowal Z.* Instruments of Probabilistic Optimisation of Load Bearing Capacity and Reliability of Statically Indeterminate Complex Structures // Archives of Civil Engineering. 2014. Vol. 60. No. 1. P. 77–90. http://doi.org/10.2478/ace-2014-0004

5. *Fedorova N.V., Savin S.Y.* Time of dynamic impact to elements of RC frame at column buckling // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety. 2019. Art. 033030. http://doi.org/10.1088/1757-899X/687/3/033030

6. *Schiessl P.* Durability of reinforced concrete structures // Construction and Building Materials. 1996. Vol. 10. Issue 5. P. 289–292. http://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00072-0

7. *Gusev B.V., Faivusovich A.S.* Development of defining equations for the mathematical theory of concrete corrosion processes // Industrial and Civil Engineering. 2020. No. 5. P. 15–27. http://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.05.15-27

8. *Berlinov M.V.* Strength resistance of reinforced concrete elements of high-rise buildings under dynamic loads // E3S Web of Conferences. 2018. Vol. 33. Article no. 02049. http://doi.org/10.1051/e3sconf/20183302049

9. *Берлинов М.В., Берлинова М.Н.* Долговечность железобетонных конструкций в условиях длительной эксплуатации // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2019. № 1 (1013). С. 60–61. EDN: YWGBBR

10. *Berlinov M.V., Berlinova M.N., Gregorian A.G.* Operational durability of reinforced concrete structures // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 91. Article no. 02012. http://doi.org/10.1051/e3sconf/20199102012

11. *Berlinov M.V.* Strength resistance of reinforced concrete elements of high-rise buildings under dynamic loads // E3S Web of Conferences. 2018. Vol. 33. Article no. 02049. http://doi.org/10.1051/e3sconf/20183302049

12. *Berlinov M.V., Berlinova M.N.* Force resistance of a non-linearly deformable reinforced concrete beam with corrosion damage under dynamic load // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Vol. 182. P. 327–335. http://doi.org/10.1007/978-3-030-85236-8_30

13. *Berlinov M., Berlinova M., Tvorogov A.* Management of degradation processes and strengthening of soils and foundations of transport structures // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 371. Article no. 04016. http://doi.org/10.1051/e3sconf/202337104016

14. *Бондаренко В.М., Творогова М.Н., Исаева Е.М.* Практический расчет силового сопротивления сжатых железобетонных стержней, поврежденных коррозией // Вестник Отделения строительных наук Российской академии архитектуры и строительных наук. 2006. № 10. С. 52.

15. *Blikharskyy Y., Selejdak J., Kopiika N., Vashkevych R.* Study of concrete under combined action of aggressive environment and long-term loading // Materials. 2021. Vol. 14 (21). Article no. 6612. http://doi.org/10.3390/ma14216612

16. *Berlinov M.V., Berlinova M.N.* Long-term exploitation of reinforced concrete constructions of transport structures on a soil base under conditions of nonlinear rheological deformation with corrosion damage // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 371. P. 567–574. http://doi.org/10.1051/e3sconf/202337104015

17. *Andrade C., Alonso C.* Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site // Construction and Building Materials. 1996. Vol. 10. Issue 5. P. 315–328. http://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00044-5

18. *Malek J., Benjeddou O.* Chemical causes of concrete degradation // MOJ Civil Eng. 2018. Vol. 4. Issue 1. P. 40–46. http://doi.org/10.15406/mojce.2018.04.00095

19. *Monteny J., Vincke E., Beeldens A., De Belie N., Taerwe L., Van Gemert D., Verstraete W* Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete // Cement and Concrete Research. 2000. Vol. 30. Issue 4. P. 623–634. http://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00219-2

20. *Тамразян А.Г., Саед Й.А.К.* Влияние коррозии на поведение железобетонных балок // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: материалы Международных академических чтений. Курский государственный университет. Курск, 2021. С. 241–249. EDN: ZFMGQV

21. *Алексейцев А.В.* Анализ устойчивости железобетонной колонны при горизонтальных ударных воздействиях // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 2. № 2. С. 3–12. http://doi.org/10.22227/2949-1622.2023.2.3-12

22. *Окольникова Г.Э., Хамракулов Р.А., Суслов Ю.В.* Перспективы развития железобетонных конструкций из высокопрочных бетонов // Системные технологии. 2016. № 1 (18). С. 7–17. EDN: WANJGJ

23. *Бондаренко В.М.* Некоторые фундаментальные вопросы развития теории железобетона // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2010. № 2. С. 5–14. EDN: LDFSUR

24. *Бондаренко В.М.* Феноменология кинетики повреждений бетона и железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в агрессивной среде // Бетон и железобетон. 2008. № 2. С. 56–61. EDN: ISDKDR

References

1. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. *Computational models of the strength resistance of reinforced concrete.* Moscow: ASV Publ.; 2004. (In Russ.) EDN: QNKPAP

2. Tamrazyan A.G. Berechnung von Strukturelementen mit einer gegebenen Normalverteilung sowie Zuverlässigkeit und Tragfähigkeit. *Monthly Journal on Construction and Architecture.* 2012;(10):109–115. (In Russ.) EDN: PDUBKP

3. Tamrazyan A., Avetisyan L. Comparative analisis of analytical and experimental results of the strength of compressed reinforced concrete columns under special combinations of loads. *MATEC Web of Conferences. 5th International Scientific Conference on Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education, IPICSE* 2016. 2016;86:01029. http://doi.org/10.1051/matecconf/20168601029

4. Kowal Z. Instruments of Probabilistic Optimisation of Load Bearing Capacity and Reliability of Statically Indeterminate Complex Structures. *Archives of Civil Engineering*. 2014;60(1):77–90. http://doi.org/10.2478/ace-2014-0004

5. Fedorova N.V., Savin S.Y. Time of dynamic impact to elements of RC frame at column buckling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety*. 2019:033030. http://doi.org/10.1088/1757-899X/687/3/033030

6. Schiessl P. Durability of reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials*. 1996;10(5):289–292. http://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00072-0

7. Gusev B.V., Faivusovich A.S. Development of defining equations for the mathematical theory of concrete corrosion processes. *Industrial and Civil Engineering*. 2020;(5):15–27. http://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.05.15-27

8. Berlinov M.V. Strength resistance of reinforced concrete elements of high-rise buildings under dynamic loads. *E3S Web of Conferences.* 2018;33:02049. http://doi.org/10.1051/e3sconf/20183302049

9. Berlinov M.V., Berlinova M.N. Durability of reinforced concrete constructions in conditions of prolonged operation. *BST: Bulletin of construction equipment.* 2019;1(1013):60–61. (In Russ.) EDN: YWGBBR

10. Berlinov M.V., Berlinova M.N., Gregorian A.G. Operational durability of reinforced concrete structures. *E3S Web of Conferences*. 2019;91:02012. http://doi.org/10.1051/e3sconf/20199102012

11. Berlinov M.V. Strength resistance of reinforced concrete elements of high-rise buildings under dynamic loads. *E3S Web of Conferences*. 2018;33:02049. http://doi.org/10.1051/e3sconf/20183302049

12. Berlinov M.V., Berlinova M.N. Force resistance of a non-linearly deformable reinforced concrete beam with corrosion damage under dynamic load. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022;182:327–335. http://doi.org/10.1007/978-3-030-85236-8_30

13. Berlinov M., Berlinova M., Tvorogov A. Management of degradation processes and strengthening of soils and foundations of transport structures. *E3S Web of Conferences.* 2023;371:04016. http://doi.org/10.1051/e3sconf/202337104016

14. Bondarenko V.M., Tvorogova M.N., Isaeva E.M. Practical calculation of the force resistance of compressed reinforced concrete rods damaged by corrosion. *Bulletin of the Department of Building Sciences of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences*. 2006;(10):52.

15. Blikharskyy Y., Selejdak J., Kopiika N., Vashkevych R. Study of concrete under combined action of aggressive environment and long-term loading. *Materials*. 2021;14(21):6612. http://doi.org/10.3390/ma14216612

16. Berlinov M.V., Berlinova M.N. Long-term exploitation of reinforced concrete constructions of transport structures on a soil base under conditions of nonlinear rheological deformation with corrosion damage. *E3S Web of Conferences*. 2023;371:567–574. http://doi.org/10.1051/e3sconf/202337104015

17. Andrade C., Alonso C. Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site. *Construction and Building Materials.* 1996;10(5):315–328. http://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00044-5

18. Malek J., Benjeddou O. Chemical causes of concrete degradation. *MOJ Civil Eng*. 2018;4(1):40–46. http://doi.org/10.15406/mojce.2018.04.00095

19. Monteny J., Vincke E., Beeldens A., De Belie N., Taerwe L., Van Gemert D., Verstraete W. Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete. *Cement and Concrete Research.* 2000; 30(4):623–634. http://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00219-2

20. Tamrazyan A.G., Said Y.A.K. Effect of corrosion on the behavior of reinforced concrete beams. In: *Safety of the Construction Fund of Russia. Problems and solutions*. *Materials of International Academic Readings. Kursk State University*. Kursk; 2021. p. 241–249. (In Russ.) EDN: ZFMGQV

21. Alekseitsev A.V. Analysis of the stability of a reinforced concrete column under horizontal impact effects. *Reinforced concrete structures.* 2023;2(2):3–12. (In Russ.) http://doi.org/10.22227/2949-1622.2023.2.3-12

22. Okolnikova G.E., Khamrakulov R.A., Suslov Yu.V. Prospects for the development of reinforced concrete structures from high-strength concrete. *System technologies.* 2016;1(18):7–17. (In Russ.) EDN: WANJGJ

23. Bondarenko V.M. Some general problems of development of reinforced concrete theory. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings.* 2010;(2):5–14. (In Russ.) EDN: LDFSUR

24. Bondarenko V.M. Phenomenology of kinetics of damages of concrete and reinforced concrete structures operated in an aggressive environment. *Concrete and reinforced concrete*. 2008;(2):56–61. (In Russ.) EDN: ISDKDR