

УДК 624.03

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/ RESEARCH ARTICLE

## Длительная эксплуатация железобетонной балки на грунтовом основании с учетом коррозионных повреждений

М.В. Берлинов<sup>1</sup>, М.Н. Берлинова<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация  
\*marina.tvor@mail.ru

**Ключевые слова:** железобетонная балка, динамический расчет, коррозия железобетона, реология деформирования, грунтовое основание фундамента

### История статьи

Поступила в редакцию: 08.11.2022

Доработана: 15.11.2022

Принята к публикации: 22.11.2022

### Для цитирования

Берлинов М.В., Берлинова М.Н. Моделирование длительной эксплуатации железобетонной балки на грунтовом основании // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 1. № 1. С. 19–27.

**Аннотация.** Представлена расчетная оценка длительной эксплуатации железобетонной балки на грунтовом основании с учетом средовых и динамических силовых воздействий. Предложена методика динамического расчета железобетонных конструкций сооружений различного типа на грунтовом основании, эксплуатируемых в агрессивной среде, также учтены внутренние факторы реологического деформирования с учетом коррозионных повреждений, отражающая их реальную работу при совместном действии нагрузки и агрессивной среды на основе современной феноменологической теории деформирования упруго ползучего тела. Показано, что 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. Показана возможность моделирования процессов деформирования железобетона в условиях длительной эксплуатации при изменяющемся режиме действия внешней нагрузки. Приведен пример расчета железобетонного гибкого фундамента на грунтовом основании при рассматриваемом сроке эксплуатации и наличии коррозионных повреждений

## Long-Term Exploitation of a Reinforced Concrete Beam on a Ground Base with Corrosion Damage

Mikhail V. Berlinov<sup>1</sup>, Marina N. Berlinova<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoeshosse, Moscow, 129337, Russian Federation

\*marina.tvor@mail.ru

**Keywords:** reinforced concrete beam, dynamic calculation, corrosion of reinforced concrete, deformation rheology, ground foundation base

**Abstract.** An estimated estimate of the long-term operation of a reinforced concrete beam on a ground base is presented, taking into account environmental and dynamic force effects. A method of dynamic calculation of reinforced concrete structures of structures of various types on a ground base operated in an

**Берлинов Михаил Васильевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Жилищно-коммунального комплекса, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARYSPIN-код: 3128-6652, Scopus: 6507352053, ResearcherID: AAE-3968-2022, ORCID: 0000-0002-9585-5460, E-mail: berlinov2010@mail.ru.  
**Берлинова Марина Николаевна**, 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.

© Берлинов М.В., Берлинова М.Н., 2023



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

**Article history**

Received: 08.11.2022

Revised: 15.11.2022

Accepted: 22.11.2022

**For citation**

Berlinov M.V., Berlinova M.N. Long-Term Exploitation of a Reinforced Concrete Beam on a Ground Base with Corrosion Damage. *Reinforced concrete structures*. 2023;1(1):19–27.

aggressive environment is proposed, internal factors of rheological deformation are also taken into account, taking into account corrosion damage, reflecting their real work under the joint action of the load and the aggressive environment on the basis of the modern phenomenological theory of deformation of the elastic creeping body. It is shown that corrosion damage to reinforced concrete elements can affect the strength of the material, change the calculation schemes, redistribute forces in the cross-sections of the structure and disrupt the joint operation of concrete with reinforcement, as well as lead to other consequences that reduce the design time of operation of structures and other operational characteristics. The possibility of modeling the processes of deformation of reinforced concrete under conditions of long-term operation with a changing mode of action of an external load is shown. An example of the calculation of a reinforced concrete flexible foundation on a soil base is given for the considered service life and the presence of corrosion damage.

**ВВЕДЕНИЕ**

При эксплуатации фундаментов 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 условиях длительной эксплуатации железобетонных конструкций, в том числе и в агрессивной среде, при различных нагрузках необходимо оценить их напряженно-деформированное состояние [1-7].

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 [8-14].

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 [15-18].

Поскольку коррозионные повреждения бетона являются критической проблемой, которая привлекает внимание ученых разных стран, высокий интерес имеют экспериментальные исследования. Так, например, работе [19] представлены экспериментальные исследования бетонных призм при одновременном воздействии агрессивной среды и постоянного уровня сжимающей силы. По результатам очевидно снижение напряжения в бетоне на 10–12 % относительно значения призмной прочности на стадии разрушения.

Важным вопросом является дальнейшая разработка методов расчета несущей способности и работоспособности железобетонных конструкций при коррозионных повреждениях. Основной причиной этого является необходимость определения долговечности и надежности зданий и сооружений и оценки срока их безопасной эксплуатации.

В результате повреждения коррозией необходимо учитывать уменьшение площади поперечного сечения бетона и арматуры. В предлагаемой статье построен метод расчета железобетонной балки на грунтовом основании при совместном воздействии агрессивной среды и силового динамического нагружения.

**Mikhail V. Berlinov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, 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: 3128-6652, Scopus: 6507352053, ResearcherID: AAE-3968-2022, ORCID: 0000-0002-9585-5460, E-mail: berlinov2010@mail.ru.

**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, Russian Federation, eLIBRARY SPIN-код: 4923-4060, Scopus: 57192657313, ResearcherID: C-3590-2019, ORCID: 0000-0003-2150-3996, E-mail: marina.tvor@mail.ru.

## МЕТОД

Исходя из общепринятой практики, усилие в поперечном сечении железобетонного элемента до образования трещин представляет собой сумму усилий, воспринимаемых арматурой и бетоном [20], тогда очевидно, что можно получить следующую формулу с учетом коррозионных повреждений в бетоне и арматуре:

$$\sigma_x(t)A_x = \sigma_{b,x}(t)K_b(z,t)A_{b,x} + \sigma_{s,x}(t)\omega_s(t)A_{s,x} \quad (1)$$

здесь:  $\sigma_x(t)$ , среднее напряжение в сечении ж/б элемента;  $\sigma_{s,x}(t)$  и  $\sigma_{b,x}(t)$  – осредненные напряжения в арматуре и бетоне;  $A_{b,x}$  и  $A_{s,x}$  – соответствуют значениям площади арматуры и бетона;

$K_b(z,t)$  – коэффициент, учитывающий степень коррозионных повреждений бетона, изменяющийся с течением времени наблюдения;  $\omega_{s,x}(t)$  – аналогичный коэффициент для учета коррозионных повреждений арматуры.

Коэффициент, учитывающий степень коррозионных повреждений бетона определяется в виде:

$$K_b(z,t) = \left\{ 1 - \left[ \frac{P}{\beta(t,t_0)} \right] \right\} = \frac{2P}{\beta^2(t,t_0)}z - \frac{1}{\beta^2(t,t_0)}z^2 \quad (2)$$

$\beta(t, t_0)$  – значение величины повреждения;

Для арматуры, подвергшейся коррозионному повреждению ее площадь необходимо рассматривать с учетом уменьшения с течением времени:

$$A_s = \omega_s(t)A_{s0} \quad (3)$$

$A_{s0}$  – площадь неповрежденной арматуры,  $\omega_s(t)$  – коэффициент, учитывающий уменьшение площади арматуры в результате коррозии, определяемый по формуле:

$$\omega_s(t) = \left[ 1 - \frac{2\theta(t,t_0)}{D} + \frac{16\theta^2(t,t_0)}{\pi D^2} \right] \quad (4)$$

где:  $D$  – диаметр арматуры;

$$\theta(t, t_0) = \frac{k}{\sqrt{a}} t^n \quad (5)$$

$k$  и  $n$  – эмпирические коэффициенты,  $a$  – величина защитного слоя бетона, мм;  $t$  – время

В случае появления трещины, можно воспользоваться общеизвестным допущением В.И. Мурашева:

$$\sigma_s = \psi_{s,m} \mu_s \omega_s(t, t_0) \sigma_{s,m}(t, t_0); \quad \varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s} = \frac{\psi_{s,m} \mu_s \omega_s(t, t_0) \sigma_{s,m}(t, t_0)}{E_s^0} \quad (6)$$

в котором:  $\sigma_s$  – среднее напряжение, возникающее в арматуре в зоне между трещинами;  $\psi_{s,m}$  – коэффициент, который учитывающий влияние сцепления арматуры и растянутого бетона;  $\mu_s$  – коэффициент армирования в этом направлении;  $\sigma_{s,m}$  – напряжение в арматуре на участке с появившимися трещинами;  $\varepsilon_s$  – относительные средние деформации на участках арматуры между появившимися трещинами;  $E_s^0$  – модуль упругости арматуры.

Современное состояние методов расчета железобетонных конструкций обусловленных силовыми и несиловыми воздействиями, не полностью отвечает реальной работе материалов. Это объясняется тем фактором, что указанные выше условия деформирования железобетона современными нормативными документами учитываются лишь косвенно [20].

В условиях длительной эксплуатации железобетонных конструкций в необходимо оценить их напряженно-деформированное состояние в результате повреждения коррозией, определить надежность, долговечность и остаточный срок эксплуатации, учитывая уменьшение площади поперечного сечения бетона и арматуры.

Современные методы расчета должны основываться на учете реальных свойств материалов под воздействием внешних нагрузок с учетом их деградации в условиях длительной эксплуатации. Как свидетельствует большинство экспериментальных данных, грунты оснований и конструкции фундаментов, изготавливаемые из железобетона, обладает ярко выраженными нелинейными и реологическими свойствами, т.е. процесс их деформирования протекает нелинейно и зависит от характера и времени действия внешней нагрузки, а длительные условия эксплуатации конструкций в грунтах оснований должны предполагать учет коррозионных процессов. В

реальных условиях конструкции фундаментов реагируют не только на величину прикладываемой нагрузки, но и на специфику ее изменения во времени, а также коррозионные повреждения.

Учет реологических свойств, режимов нагружения и коррозионных повреждений является важным фактором при расчете фундаментов в связи с тем, что они находятся под действием циклически изменяющейся нагрузки и процессов коррозии при эксплуатации [8].

В предлагаемой статье делается попытка максимально приблизить расчетный метод к реальной работе материалов под действием изменяющейся во времени внешней нагрузки и коррозионных повреждений. Рассмотрим гибкий фундамент, нагруженный равномерно распределенной нагрузкой, циклически изменяющейся во времени,

В качестве исходных предпосылок примем основополагающие гипотезы о деформировании упруго ползучего тела, тогда исходное разрешающее уравнение примет следующий вид:

$$\frac{d^2}{dx^2} \left( \tilde{B}(t) \frac{d^2 \omega}{dx^2} \right) - m \frac{d^2 \omega}{dt} = q(x, t) - p(x), \quad (7)$$

где  $q(x, t)$  и  $p(x, t)$  - соответственно нагрузка на балку, и реакция грунтового основания;  $\tilde{B}(t)$  - нелинейный интегральный оператор, зависящий от уровня напряженного состояния с учетом коррозионных повреждений будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \tilde{B}(t) = (1 + i\Gamma) \left\{ \left[ \frac{K_b(t)bz^3}{12} + z \left( q_0 - \frac{z}{2} \right)^2 \right] \int_{-\frac{z}{2}}^{\frac{h}{2}} \left[ E_0(t)F(\varepsilon) - \int_{t_0}^t F(\varepsilon)K(\omega, \sigma)C(t, \tau) d\tau \right] dz + \right. \\ \left. \frac{E'_{s1} \omega_s(t)A'_s}{\psi_s(1-\mu'_s)} (q_0 - a'_s)^2 + \frac{E_s \omega_s(t)A_s}{\psi_b(1-\mu_s)} (h_0 - q_0)^2 \right\} \quad (8) \end{aligned}$$

в котором,  $i\Gamma$  - коэффициент неупругого сопротивления согласно гипотезе частотно-независимого внутреннего трения;  $z$  – высота сжатой зоны;  $E_0(t)$  – начальный модуль упругости бетона;  $F(\varepsilon)$  - функция нелинейности деформирования, определяемая из экспериментальных данных;  $C(t, \tau)$  – мера ползучести;  $E_s, E'_s$  – соответственно модули деформаций растянутой и сжатой арматуры;  $A_s, A'_s$  – площади растянутой и сжатой арматуры;  $q_0$  – расстояние от центра тяжести приведенного сечения до сжатой зоны;  $K(\omega, \sigma)$  - коэффициент виброползучести, определяемый по методике [1]:

$$K(\omega, \sigma) = \frac{\Phi_{no}(\sigma_{max}, \sigma_{min}, \omega_{min})}{\Phi_{no}(\sigma_{max}, \sigma_{min}, \omega)} \quad (9)$$

Очевидно, что замкнутое интегрирование уравнения (7) с учетом выражений (8) и (9) встретит непреодолимые математические трудности, разрешить которые можно только с помощью линеаризации задачи. Линеаризация осуществима с помощью метода интегральных оценок [1], заключающемся в фиксации процессов ползучести в рассматриваемых период наблюдения и применения пошагового метода для учета режимности нагружения, а также использования метода последовательных приближений на основе конечных разностей, при чем для улучшения сходимости интеграционного процесса используется способ последовательного дифференцирования.

Разностное уравнение для  $i$ -той точки балки (рис. 1) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \tilde{B}_{i-1}^{(k)}(\omega_{i-2} - 2\omega_{i-1} + \omega_i) - 2\tilde{B}_i^{(k)}(\omega_{i-1} - 2\omega_i + \omega_{i+1}) + \tilde{B}_{i+1}^{(k)}(\omega_i - 2\omega_{i+1} + \omega_{i+2}) + \Delta^4 p_i^{(k)} - \\ m_i \omega^2(\omega_i - \omega_{i-1}) \frac{\Delta}{2} = \Delta^4 q^{(k)}(x, t), \quad (10) \end{aligned}$$

где:  $k$  - номер соответствующего приближения.

Тогда жесткость сечения с учетом линеаризации примет следующий вид:

$$\tilde{B}_i = (1 + i\Gamma) E_i^{\mu\mu}(t) \left[ \frac{K_b(t)bz^3}{12} + x \left( q_0 - \frac{x}{2} \right)^2 \right] + \frac{\beta'_s E'_s \omega_s(t)A'_s}{(1-\mu'_s)} (q_0 - \alpha_s)^2 + \frac{\beta_s E_s \omega_s(t)A_s}{(1-\mu_s)} (h_0 - q_0)^2. \quad (11)$$

здесь: –  $E_i^{\mu\mu}(t)$  – интегральный модуль деформаций, определяемый из выражения:

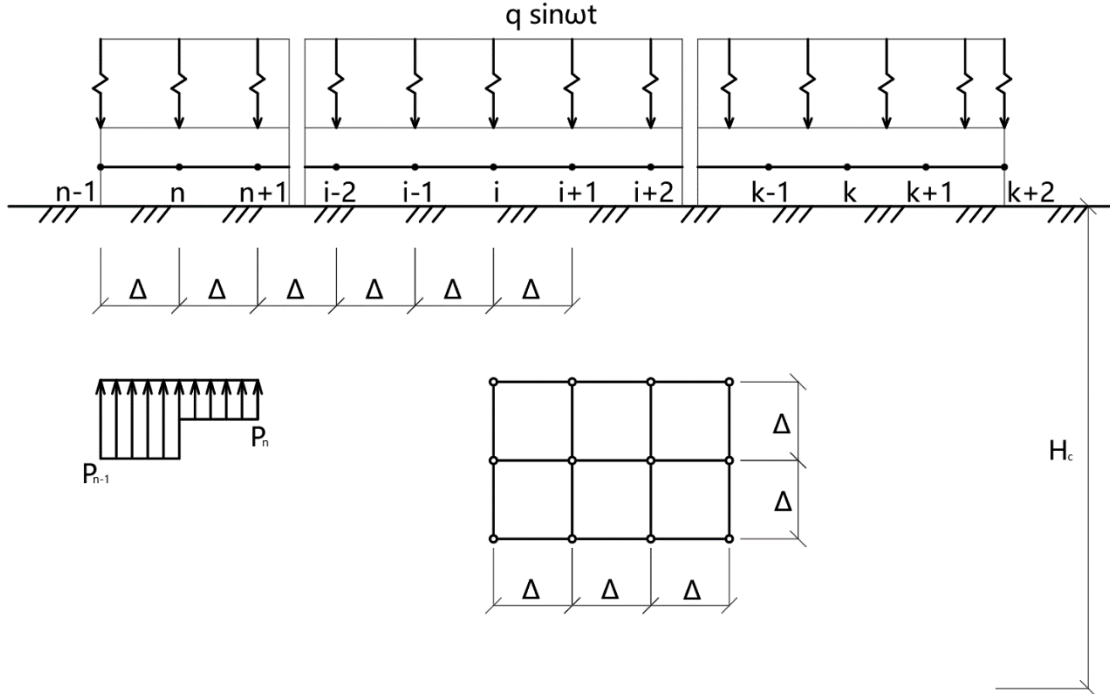
$$\frac{1}{E_i^{\mu\mu}(t)} = S(p) \left[ \frac{1}{E^0(t)} + K(\omega, \sigma)C(t, t_0). \right] \quad (12)$$

где:  $S(p)$  - функция нелинейности, определяемая по степенному закону  $S(p) = \left[ 1 + \eta \left( \frac{p}{R} \right)^m \right]$

Для участков балки, работающих без трещин, жесткость должна определяться в следующем виде [17]:

$$B(t) = E^0(v,t)I_{red} \quad (13)$$

$I_{red}$  - момент инерции приведенного поперечного сечения относительно его центра тяжести, определяемый при отсутствии трещин.



**Рис. 1.** Расчетная и конечно-разностные схемы  
**Figure 1.** Calculation and finite difference schemes

Заметим, что решения систем уравнений (10), записанных для всех участков балки в случае гармонического источника внешних воздействий, будут учитывать диссипативные свойства материала, обусловленные внутренним трением в форме

$$\omega_i^{(k)} = \omega l^{-\Gamma \omega l/2} \sin(\omega t). \quad (14)$$

Реактивное давление  $p(x,t)$ , входящее в формулу (7) в пределах каждого элемента балки,  $\Delta$  считается постоянным (рис. 1).

Для учета диссипативных и инерционных свойств основания при определении отпора  $p(x,t)$  необходимо совместное рассмотрение уравнений равновесия плоской задачи:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \Gamma q &= \rho \frac{\partial^2 \omega}{\partial \tau^2}; \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2}. \end{aligned} \quad (15)$$

И геометрических уравнений:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial \omega}{\partial z}; \quad \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \Gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial \omega}{\partial x}. \quad (16)$$

И физических уравнений деформирования упруго ползучего тела, записанных относительно напряжений:

$$\begin{aligned} \sigma_z(t) &= \frac{(1+i\Gamma)E_0(t)}{[1+v(t)][1-2v(t)]} \{ [1-v(t)]F(\varepsilon)\varepsilon_z(t) + v(t)F(\varepsilon)\varepsilon_x(t) \} - (1 + \\ \Gamma_i) \int_{t_0}^t &\left\{ \frac{F(\varepsilon)\varepsilon_z(t)[1-v(t)]}{[1-v(\tau)][1-2v(\tau)]k(\omega,\sigma_z)} - \frac{v(\tau)F(\varepsilon)\varepsilon_x(\tau)}{[1+v(\tau)][1-2v(\tau)]k(\omega,\sigma_x)} \right\} C(t,\tau) d\tau; \end{aligned} \quad (17)$$

$$\sigma_x(t) = \frac{(1 + i\Gamma)E_0(t)}{[1 + \nu(t)][1 - 2\nu(t)]} \{ [1 - \nu(t)]F(\varepsilon)\varepsilon_x(t) + \nu(t)F(\varepsilon)\varepsilon_z(t) \} - (1 + \Gamma_i) \int_{t_0}^t \left\{ \frac{F(\varepsilon)\varepsilon_x(t)[1 - \nu(t)]}{[1 - \nu(\tau)][1 - 2\nu(\tau)]k(\omega, \sigma_x)} - \frac{\nu(\tau)F(\varepsilon)\varepsilon_z(\tau)}{[1 + \nu(\tau)][1 - 2\nu(\tau)]k(\omega, \sigma_x)} \right\} C(t, \tau) d\tau;$$

$$\tau_{xz}(t) = (1 + i\Gamma) \left\{ \frac{E_0(t)}{2[1 + \nu(t)]} F(\Gamma)\Gamma_{xz}(t) - \int_{t_0}^t \frac{F(\Gamma)\Gamma_{xz}(\tau)}{2[1 + \nu(\tau)]k(\omega, \tau_{xz})} R(t, \tau) d\tau \right\}. \quad (18)$$

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

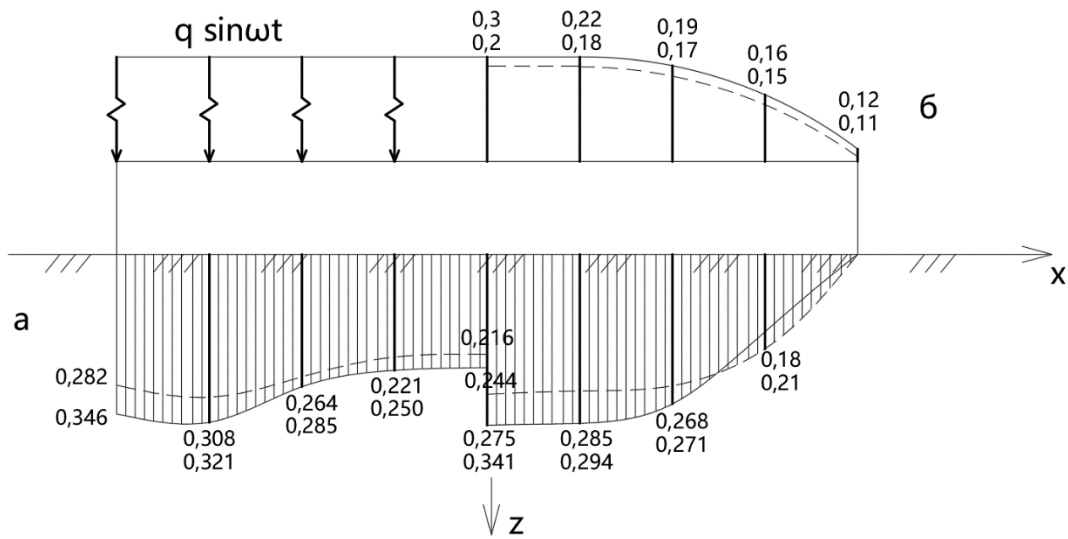
Для численного решения задачи о деформировании балки в основании выделяется область грунта, на границах которой перемещения равны 0. В пределах этой области и формируется сетка метода конечных разностей. Из теоретических и экспериментальных исследований известно, что величина перемещений основания, практически не оказывающая влияния на работу балки, находится за пределами области, размер которой ограничен по глубине размером  $H_c = l$ , а на границе полуплоскости – расстояния  $a = l/2$ , отчитываемым от краев балки ( $l$  – длина балки).

При численном решении в качестве неизвестных принимались перемещения узлов разностной сетки, нанесенной на основание, и вертикальные реактивные давления, определяемые из дифференциальных уравнений равновесия с учетом с учетом линеаризации и равенства вертикальных перемещений плиты и вертикальных перемещений поверхности основания в зоне контакта.

Способ решения основывается на разделении системы «балка - основание» на два объекта - балку и основание, последовательно рассчитываемые друг за другом при выполнении граничных условий. При этом жесткости балки входят в одну систему уравнений, а формулы (17) формируют другую систему уравнений, причем в первом приближении основание считается упругим и рассчитывается в предположении, что балка является абсолютно жесткой. Затем в ходе итераций жесткость и перемещения основания уточняются в условиях нелинейного деформирования.

Получение оптимального решения значительно осложняется тем, что на каждом шаге использования метода последовательных итераций, необходимо выполнять расчет балки в нелинейной постановке. Предлагаемая методика позволит получать максимально экономичные конструкции.

В качестве иллюстрации приведем пример динамического расчета балки на грунтовом основании. Размеры балки  $h \times b \times l = 40 \times 60 \times 300$  см, класс бетона - В25, арматуры - А-400, грунт основания - суглинок  $E_0 = 12$  МПа. Функции нелинейности, ползучести, а также другие физико-механические характеристики определялись на основании опытных данных по методике, изложенной в [1]. Грунт основания имеет следующие физико-механические характеристики:  $E_0(t) = 20$  МПа,  $R = 0,25$  МПа,  $\eta_m = 1,29$ ;  $m = 2,48$ ;  $\nu = 0,3$ ;  $\eta_n = 2,3$ ;  $c(t, t_0) = 0,00278 \frac{1}{\text{МПа}}$ ;  $\gamma = 0,025 \frac{1}{\text{час}}$ . Параметры коррозионных повреждений арматуры  $k=1,62$ ,  $n=0,68$ , толщина защитного слоя бетона  $a=30$  мм. Возраст бетона 28 суток, время наблюдения 30 лет. Результаты показаны на рис. 2. Сравнивая их, можно сделать следующие выводы: учет времени эксплуатации и коррозионных повреждений, а также нелинейности и неравновесности деформирования вызывают перераспределение усилий с более на менее нагруженные участки балки и основания и приводят к снижению максимального динамического изгибающего момента на 19%, максимальной ординаты эпюры отпоров на 18% и увеличивает минимальные значения на 16% и 13% соответственно. А учет инерционности и диссипативности грунтового основания приводит к снижению максимальной амплитуды колебаний на 33% по сравнению с упругим расчетом.



**Рис. 2.** Эпюры отпоров МПа (а); амплитуд колебаний, мм (б); изгибающих элементов, мНм (в); — упругая постановка по схеме линейно-деформируемого полупространства; - - - нелинейная и неравновесная постановка с учетом времени эксплуатации и коррозионных повреждений

**Figure 2.** MPa rebuff plots (a); oscillation amplitude, mm (b); bending elements, mNm (v); — elastic staging according to the scheme of linear-deformable semispace; - - - nonlinear and non-equilibrium staging, taking into account the operating time and corrosion damage

Приведенные расчетные данные с большей степенью точности соответствуют опытным данным по сравнению с линейными методами, что объясняется более полным учетом реальных свойств материалов в условиях динамического деформирования.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учет нелинейности, реологии деформирования и коррозионных повреждений при длительном действии внешней нагрузки приводит к трансформации эпюр грунта и 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.

Предлагаемая методика позволяет еще на этапе проектирования назначать характеристики конструктивных элементов различных сооружений с учетом длительности сроков эксплуатации, нелинейности и реологии деформирования, а также возможности учета коррозионных повреждений, что позволит определять размеры поперечных сечений и назначать требуемые классы бетона и арматуры с учетом перечисленных факторов.

Более полный учет 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 разгрузки, что поможет изыскать дополнительные резервы прочности и обеспечить экономию материалов при длительных сроках эксплуатации сооружений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко В.М. Феноменология кинетики повреждений бетона и железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в агрессивной среде. // Бетон и железобетон. 2008. №2, С. 56—61.
2. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона, Монография. 2004. 112 с.
3. Тамразян А.Г. Расчет конструктивных элементов с заданным нормальным распределением и надежностью и несущей способностью // Вестник МГСУ. 2012. № 10. С.109-115.
4. Тамразян А.Г., Саед Й.А.К. Влияние коррозии на поведение железобетонных балок // В сборнике: БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬНОГО ФОНДА РОССИИ. ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ. Материалы Международных академических чтений. Курский государственный университет. Курск, 2021. С.241-249.
5. Gusev B.V., Faivusovich A.S. Development of defining equations for the mathematical theory of concrete corrosion processes // Industrial and Civil Engineering. 2020. № 5. С.15-27. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.05.15-27.
6. 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.
7. Green W., Chess P. Durability of Reinforced Concrete Structures // CRC Press. 2019. DOI: 10.1201/9780429298189.
8. Берлинов М.В. Основания и фундаменты. С-Петербург: Издательство «Лань», 2022. 320 с.
9. Степанова В.Ф., Степанов А.Ю. Коррозия и защита арматуры в бетонах на пористых заполнителях. Москва: НИЦ Стр-во, НИИЖБ им. А. А. Гвоздева, 2016. 191 с.
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. Schiessl P. Durability of reinforced concrete structures. Construction and Building Materials. 1996. V. 10, Issue 5, Pp. 289-292. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00072-0](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00072-0)
12. Berlinov, M., Berlinova, M. Long-term durability of concrete structures // Journal of Physics: Conference Series. 2020, 1614(1), 012006.
13. Berlinov M.V. Strength resistance of reinforced concrete elements of high-rise buildings under dynamic loads // E3S Web of Conferences. 2018. V. 33. С.02049.
14. Берлинов М.В., Берлинова М.Н. Долговечность железобетонных конструкций в условиях длительной эксплуатации // Бюллетень строительной техники. 2019. № 1 (1013). С. 60-61.
15. Берлинов М.В., Берлинова М.Н., Творогов А.В., Печкина Е.К. Учет коррозионных повреждений эксплуатируемых железобетонных конструкций в условиях трехосного напряженно-деформированного состояния // Строительство и архитектура. 2020. Т.8. №3. С.40-46.
16. Берлинова М.Н., Бобров В.В. Оценка влияния деструктивных процессов на длительную прочность бетона // Промышленное и гражданское строительство. 2014. №6. С.10-13.
17. Назаренко В.Г., Творогова М.Н., Луканцов П.Н. О построении функций старения бетона // Бетон и железобетон. 2010. №6. С.23.
18. Байдин О.В. О силовом сопротивлении железобетона, поврежденного коррозией // Вестник Белгородского государственного технологического университета им В.Г.Шухова. 2012. № 2. С. 11-14.
19. Blikharsky Y., Selezjak J., Kopyika N., Vashkevych R. Study of Concrete under Combined Action of Aggressive Environment and Long-Term Loading // Materials. 2021, 14(21), 6612; <https://doi.org/10.3390/ma14216612>.
20. СП 63.13330.2018 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Обновленная редакция СНиП 52-01-2003. М.: Минстрой РФ, 2020. 150 с.

## REFERENCES

1. Bondarenko V.M. Phenomenology of kinetics of damage to concrete and reinforced concrete structures operated in an aggressive environment. *Concrete and reinforced concrete*. 2008. No 2, pp. 56–61.
2. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. Calculated models of force resistance of reinforced concrete. Moscow: Publishing of ASV, 2004. 112 p.
3. Tamrazyan A.G. Calculation of structural elements with a given normal distribution and reliability and bearing capacity. *Vestnik MGSU*. 2012. no 10. Pp.109-115.
4. Tamrazyan A.G., Syed Y.A.K. Influence of corrosion on the behavior of reinforced concrete beams. In the collection: SAFETY OF THE CONSTRUCTION FUND OF RUSSIA. PROBLEMS AND SOLUTIONS. Materials of the International Academic Readings. Kursk State University. Kursk, 2021. Pp.241-249.
5. 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. pp.15-27. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.05.15-27.



6. 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 Construction Sciences of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences*. 2006. No 10. p. 52.
7. Green W., Chess P. *Durability of Reinforced Concrete Structures*. CRC Press, (2019). DOI: 10.1201/9780429298189.
8. Berlinov M.V. *Foundations and Foundations*. St. Petersburg.: Izdatelstvo «Lan'», 2022. 320 p.
9. Stepanova V.F., Stepanov A.Y. Corrosion and protection of reinforcement in concretes on porous aggregates. Moscow: NIIZHB named after A. A. Gvozdev, 2016. 191 p.
10. Putlyayev 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. Schiessl P. Durability of reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials*. 1996. V. 10, Issue 5, Pp. 289-292. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00072-0](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00072-0)
12. Berlinov, M., Berlinova, M. Long-term durability of concrete structures. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, 1614(1), 012006.
13. Berlinov M.V. Strength resistance of reinforced concrete elements of high-rise buildings under dynamic loads. *E3S Web of Conferences*. 2018. V. 33. C.02049.
14. Berlinov M.V., Berlinova M.N. Durability of reinforced concrete structures in conditions of long-term operation. *Bulletin of construction technique*. 2019. No 1 (1013). S. 60-61.
15. Berlinov M.V., Berlinova M.N., Tvorogov A.V., Pechkina E.K. Accounting of corrosion damage to exploited reinforced concrete structures in conditions of a three-axis stress-strain state. *Construction and architecture*. 2020. T.8. No 3. P.40-46.
16. 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.
17. Nazarenko V.G., Tvorogova M.N., Lukantsov P.N. On the construction of the functions of aging of concrete. *Concrete and reinforced concrete*. 2010. No 6. Pp.23.
18. Baydin O.V. On the force resistance of reinforced concrete damaged by corrosion. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2012. No 2. Pp. 11-14.
19. Blikharsky Y., Selejdak J., Kapiika N. and Vashkevych R. Study of Concrete under Combined Action of Aggressive Environment and Long-Term Loading. *Materials*. 2021, 14(21), 6612; <https://doi.org/10.3390/ma14216612>.
20. SP 63.13330.2018 SNiP 52-01-2003 Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. Moscow: Minstroy RF, 2020. 150 p.