



УДК 69.07

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH ARTICLE

DOI: 10.22227/2949-1622.2024.4.23-32

Длительная эксплуатация гибкого фундамента в условиях нелинейного реологического деформирования при силовых и средовых воздействиях

М.В. Берлинов^{1*}

¹ *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Москва, Российская Федерация*

* marina.tvor@mail.ru

Ключевые слова: железобетонная конструкция, фундамент, коррозионные повреждения, нагрузка, напряжения, деформации, реология, грунтовое основание, эксплуатация, расчетная схема

История статьи

Поступила в редакцию: 30.09.2024

Доработана: 05.10.2024

Принята к публикации: 07.10.2024

Для цитирования

Берлинов М.В. Длительная эксплуатация гибкого фундамента в условиях нелинейного реологического деформирования при силовых и средовых воздействиях // Железобетонные конструкции. 2024. Т. 8. № 4. С. 23–32.

Аннотация. Предложена методика расчета железобетонного гибкого фундамента на грунтовом основании в агрессивной среде в условиях реологического деформирования с учетом коррозионных повреждений, отражающая его реальную работу при совместном влиянии силовых и несиловых воздействий на основе современной феноменологической теории деформирования упруго ползучего тела. Показана возможность рассмотрения процессов длительного деформирования железобетона при изменяющемся режиме действия внешней нагрузки на основе метода интегральных оценок. Представлена расчетная оценка длительной эксплуатации железобетонной балки на грунтовом основании с учетом коррозионных повреждений. Показано, что средовые повреждения железобетонных конструкций могут повлиять на прочность материала, изменить схемы расчетов, перераспределить усилия в сечениях конструкции, а также привести к другим последствиям, которые снижают проектные сроки эксплуатации зданий. Приведен пример расчета железобетонного гибкого фундамента жилого здания на грунтовом основании с учетом сил трения по его подошве при различных сроках эксплуатации и наличии коррозионных повреждений.

Long-Term Exploitation of a Flexible Foundation in Conditions of Nonlinear Rheological Deformation under Force and Non-Force Influences

М.В. Berlinov^{1*}

¹ *Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russian Federation*

* marina.tvor@mail.ru

Михаил Васильевич Берлинов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Жилищно-коммунального комплекса, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARY SPIN-код: 3128-6652, Scopus: 6507352053, ResearcherID: AAE-3968-2022, 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/4.0/>

Keywords: reinforced concrete structure, foundation, corrosion damage, load, stresses, deformations, rheology, soil foundation, exploitation, design scheme

Article history

Received: 30.09.2024

Revised: 05.10.2024

Accepted: 07.10.2024

For citation

Berlinov M.V. Long-Term Exploitation of a Flexible Foundation in Conditions of Nonlinear Rheological Deformation under Force and Non-Force Influences. *Reinforced Concrete Structures*. 2024; 4(8):23-32.

Abstract. A method is proposed for calculating a reinforced concrete flexible foundation on a soil base in an aggressive environment under rheological deformation conditions, taking into account corrosion damage, reflecting its real operation under the combined influence of force and non-force influences based on the modern phenomenological theory of deformation of an elastic creeping body. The possibility of considering the processes of long-term deformation of reinforced concrete under a changing mode of action of an external load based on the method of integral estimates is shown. It is shown that environmental damage to reinforced concrete structures can affect the strength of the material, change the calculation schemes, redistribute efforts in the sections of the structure and also lead to other consequences that reduce the design life of buildings. An example of the calculation of a reinforced concrete flexible foundation of a residential building on a soil base is given, taking into account the friction forces along its sole at various periods of service life and the presence of corrosion damage.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях длительной эксплуатации железобетонных конструкций в агрессивной среде при различных нагрузках необходимо оценить их напряженно-деформированное состояние в результате повреждения коррозией, учитывая уменьшение площади поперечного сечения бетона и арматуры [1–4].

Задачи обеспечения безотказной эксплуатации, конструктивной безопасности, живучести зданий, сооружений, коммуникационных и транспортных систем вследствие ряда объективных неотвратимых факторов экстремального природного, техногенного или диверсионного происхождения, предельно обострившихся в текущем тысячелетии, не могут быть исчерпывающе решены в рамках существующих объемно-планировочных композиций, конструктивных и расчетных концепций [5, 6].

Коррозионные повреждения железобетонных конструкций 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 [7–10].

Применительно к бетонным и железобетонным конструкциям, эксплуатируемым в агрессивных средах или подвергающимся разрушительным физическим воздействиям, отсутствуют предложения, необходимые для построения расчетных моделей силового сопротивления, что приводит к несоблюдению требований по безопасности и предельным состояниям при действующих нагрузках в течение всего периода эксплуатации [11, 12]. Это неизбежно приводит к снижению остаточного ресурса элементов зданий и сооружений и сокращению периода эксплуатации объекта от момента контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние, при котором дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна.

МЕТОД

Рассматривая усилие в поперечном сечении железобетонного элемента до появления трещин как сумму усилий, воспринимаемых арматурой и бетоном, можно получить следующую математическую зависимость с учетом коррозионных повреждений в бетоне и арматуре:

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

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; SPIN-code: 3128-6652, Scopus: 6507352053, ResearcherID: AAE-3968-2022, ORCID: 0000-0002-9585-5460, E-mail: berlinov2010@mail.ru

где $\sigma_x(t)$ — среднее напряжение в сечении ж/б элемента;

$\sigma_{b,x}(t)$ и $\sigma_{s,x}(t)$ — осредненные напряжения в арматуре и бетоне;

$K_b(z,t)$ — функция повреждений элемента по глубине, ответственная за количественный учет влияния химкоррозионных повреждений на его силовое сопротивление (рис. 1, 2);

$A_{b,x}$ и $A_{s,x}$ — соответствуют значениям площади арматуры и бетона;

$\omega_s(t)$ — аналогичный коэффициент для учета коррозионных повреждений арматуры. Учет средовых повреждений бетона определяется с помощью коэффициента коррозионных повреждений в виде:

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

где $\beta(t, t_0)$ — значение величины повреждения (рис. 1).

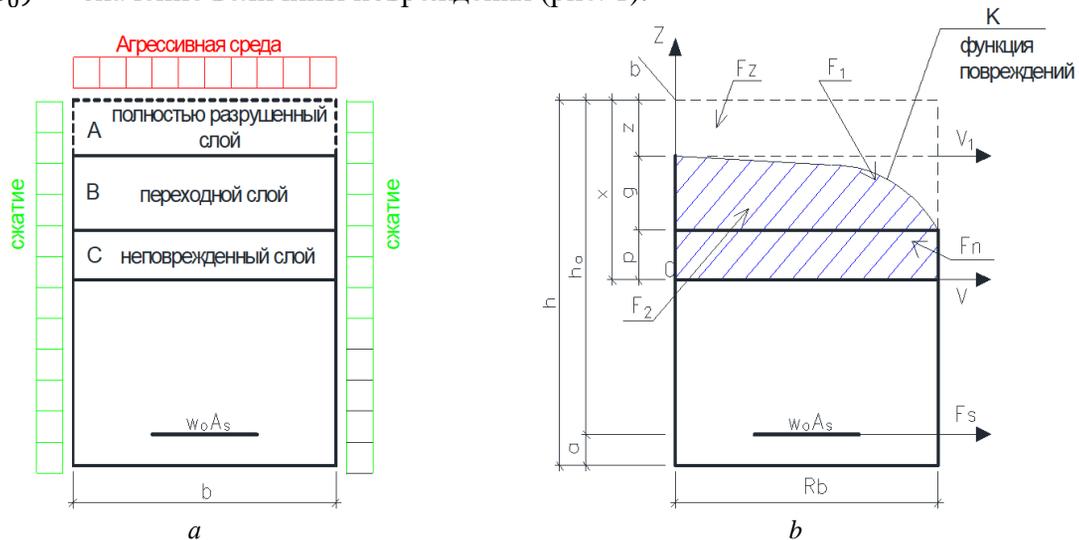


Рис. 1. Учет влияния повреждений на силовое сопротивление бетонного сечения (а); схема напряженного состояния нормального поперечного сечения, поврежденного коррозией (b)

Fig. 1. Consideration of the effect of damage on the force resistance of the concrete section (a); diagram of the stress state of the normal cross section damaged by corrosion (b)

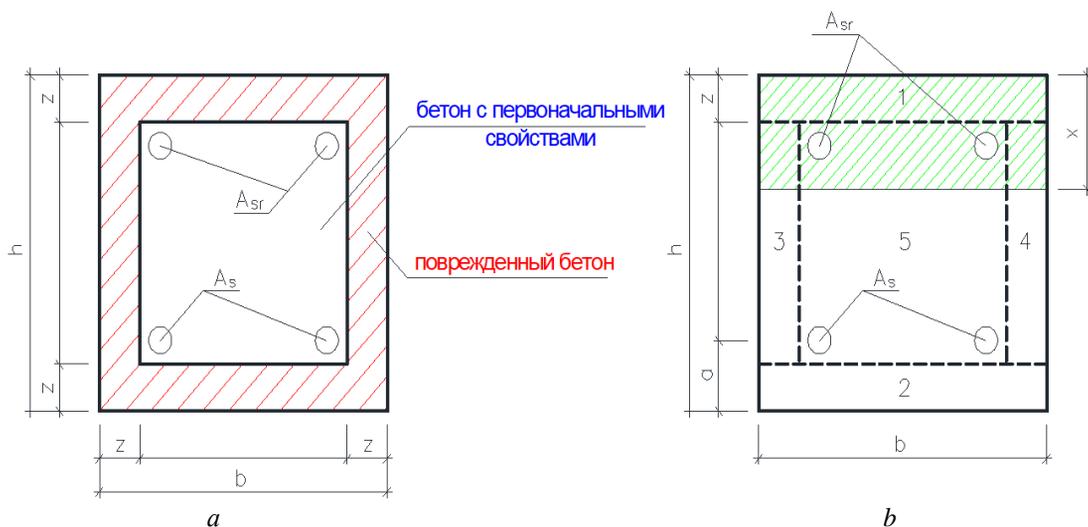


Рис. 2. Повреждение железобетонного элемента по всему периметру сечения (а); 1–4 — коррозионно-поврежденные зоны; 5 — неповрежденная зона (b)

Fig. 2. Damage to a reinforced concrete element along the entire perimeter of the section (a); 1–4 — corrosion-damaged zones; 5 — undamaged zone (b)

Площадь арматуры с учетом коррозии необходимо рассматривать с учетом снижения ее площади с течением времени:

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

где 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;

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

где k и n — эмпирические коэффициенты;

a — величина защитного слоя бетона, мм;

t — время.

Для сечений с трещинами можно воспользоваться общеизвестным допущением:

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

где σ_s — среднее напряжение, возникающее в арматуре в зоне между трещинами;

$\psi_{s,m}$ — коэффициент, учитывающий сцепление арматуры и растянутого бетона;

μ_s — коэффициент армирования в этом направлении;

$\sigma_{s,m}$ — напряжение в арматуре на участке с появившимися трещинами;

ε_s — относительные средние деформации на участках арматуры между появившимися трещинами;

E_s^0 — модуль упругости арматуры.

Существующие методы расчета железобетонных конструкций с учетом силовых и несилловых воздействий не полностью отвечают реальной работе материалов. Сбор, анализ информации и оценка повреждений материалов и конструкций зданий и сооружений являются первоочередной задачей. При этом исходные данные должны относиться конкретно к адресному элементу и, более того, к частным локальным сечениям и узлам. Такие данные позволяют на основе разработанного аппарата расчета установить ресурс силового сопротивления, принять радикальное решение по дальнейшему использованию конструкции и построить прогноз силовой реакции сооружения на проектные и запроектные воздействия [13]. Это объясняется тем фактором, что указанные выше условия деформирования железобетона современными нормативными документами учитываются лишь косвенно.

Применительно к бетонным и железобетонным конструкциям, эксплуатируемым в агрессивных средах или подвергающимся разрушительным физическим воздействиям, отсутствуют предложения, необходимые для построения расчетных моделей силового сопротивления. Большинство экспериментальных данных демонстрируют, что грунты оснований и конструкции фундаментов обладают 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 действительности же конструкции фундаментов реагируют не только на величину прикладываемой нагрузки, но и на специфику ее изменения во времени, а также средовые повреждения.

В предлагаемой статье изложены теоретические основы, алгоритмы расчета остаточного ресурса силового сопротивления поврежденного коррозией железобетонного фундамента. Рассмотрим гибкий фундамент, нагруженный посередине сосредоточенной силой, циклически изменяющейся во времени, причем будем предполагать, что скорость ее изменения во времени невелика и возникающими силами инерции можно пренебречь в силу их малости, т.е. расчет проведем по статической схеме. Решение задачи будем искать с помощью дис-

кретного метода. Запишем разрешающие уравнения смешанного метода, учитывая горизонтальные силы трения, возникающие в зоне контакта балки с основанием для упруго линейной постановки задачи:

$$\begin{aligned} \{\delta\} \{W\} + \{\Delta_p\} + \{Y\} &= 0; \\ \sum_{i=1}^n P_i - \sum_{i=1}^n X_i &= 0; \\ \sum_{i=1}^n S_i - \sum_{i=1}^n T_i &= 0; \\ \sum_{i=1}^n M_0(P_i) + \sum_{i=1}^n S_i y_i - \sum_{i=1}^n X_i a_i - \frac{h}{2} \sum_{i=1}^n T_i &= 0, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\{\delta\}$ — единичные перемещения в основной системе (рис. 3);

$\{W\} = \begin{Bmatrix} X_i \\ T_i \end{Bmatrix}$ — искомые неизвестные;

X_i — неизвестная вертикальная реакция;

T_i — неизвестная горизонтальная реакция;

$\{\Delta_p\}$ — грузовые перемещения в основной системе;

$\{Y\} = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ \varphi \end{Bmatrix}$ — перемещения заделки балки в основной системе;

u — горизонтальное смещение;

v — вертикальное смещение;

φ — угол поворота;

P_i — внешняя вертикальная нагрузка;

S_i — внешняя горизонтальная нагрузка.

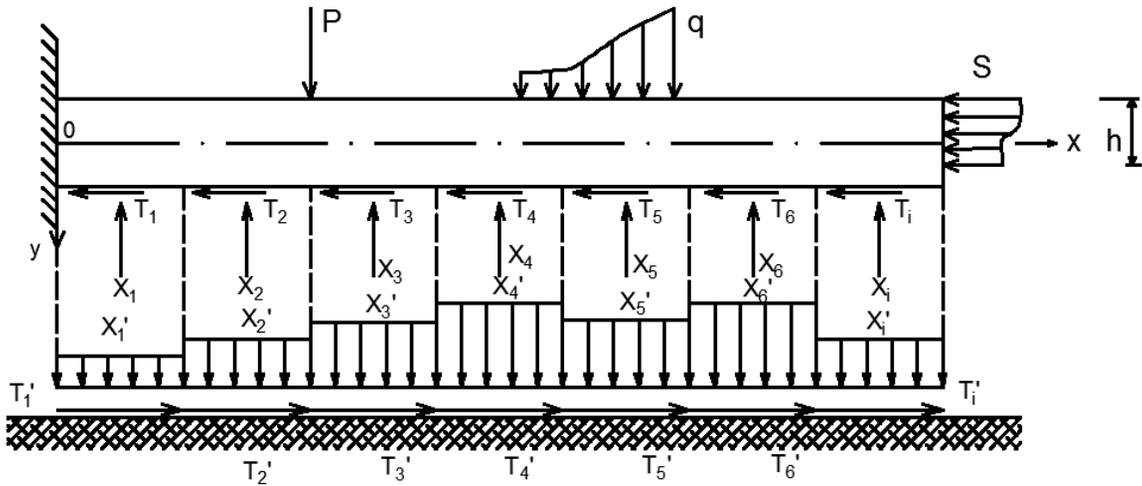


Рис. 3. Основная система

Fig. 3. The main system

Единичные перемещения в основной системе по направлению искомых неизвестных складываются из трех составляющих: вертикального перемещения основания от единичной нагрузки, горизонтального перемещения основания от горизонтальной единичной нагрузки и изгиба балки от действия единичных вертикальных и горизонтальных сил, определяемых по обычному правилу Мора – Верещагина:

$$\delta = \frac{1 - \nu_0^2}{\pi E e(\nu, t)} \iint_0^F \frac{X(\xi) d\xi d\eta}{\sqrt{(X - \xi)^2 + (y - \eta)^2}} + \frac{(1 - \nu_0)(1 - 2\nu)}{2\pi E e(\nu, t)} \cdot \iint_0^F \frac{T(\xi)(X - \xi) d\xi d\eta}{(X - \xi)^2 + (y - \eta)^2} + \int_0^l \frac{M_i M_k}{D} dv. \quad (8)$$

Осуществляя переход к нелинейной и неравновесной задаче, используем теорему Артюняна о тождественности напряженно-деформированного состояния в упругом и упруго

получем массиве, распространенную на случай нелинейного деформирования, получим выражение для перемещений:

$$\delta = \frac{1-\nu^2}{\pi E^e(\nu, t)} S_m \left[\frac{P(t)}{R} \right] \iint_0^F \frac{P(\xi) d\xi d\eta}{\sqrt{(X-\xi)^2 + (Y-\eta)^2}} - \frac{1-\nu^2}{\pi} \int_{t_0}^t \iint_0^F \frac{P(\xi, \tau) d\xi d\eta}{\sqrt{(X-\xi)^2 + (Y-\eta)^2}} \times$$

$$\times x S_n \left[\frac{P(\tau)}{R} \right] \frac{\partial C(t, \tau)}{\partial \tau} d\tau + \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{2\pi E^e(\nu, t)} S_n \left[\frac{T(t)}{R} \right] \iint_0^F \frac{T(\xi)(X-\xi) d\xi d\eta}{\sqrt{(X-\xi)^2 + (Y-\eta)^2}} - \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{2\pi} \times$$

$$\times \int_{t_0}^t \iint_0^F \frac{T(\xi, \tau)(X-\xi) d\xi d\eta}{\sqrt{(X-\xi)^2 + (Y-\eta)^2}} S_n' \left[\frac{T(t)}{R} \right] \frac{\partial C(t, \tau)}{\partial \tau} d\tau + \int_{t_0}^t \int_0^l \frac{M_i M_k}{D(\tau)} d\nu d\tau,$$

где S_m — функция нелинейности деформирования, которую предлагается использовать в следующем виде:

$$S = \left[1 + \eta \left(\frac{P}{R} \right)^m \right]; \quad (10)$$

где $E(t)$ и $C(t, \tau)$ — соответственно модуль упруго мгновенных деформаций и мера ползучести;

$d(\tau)$ — жесткость железобетонного сечения, принимаемая в следующем виде:

$$d(\tau) = E^e(\nu, t) \left[\frac{K_b(t) b X^3}{12} + b x \left(q_0 - \frac{X}{2} \right)^2 \right] + E'_a \omega_s(t) A'_a (q_0 - a')^2 + \frac{E_a \omega_s(t) A_a}{\Psi_a} (h_0 - q_0)^2; \quad (11)$$

$$\frac{1}{E^e(\nu, t)} = \frac{1}{E^0(t)} \left[1 + \eta_m \left\langle \frac{P(t)}{R} \right\rangle^m \right] + C(t, t_0) \left[1 + \eta_n \left\langle \frac{P(t)}{R} \right\rangle^m \right], \quad (12)$$

где $E^e(\nu, t)$ — интегральный модуль деформаций, учитывающий нелинейность деформирования;

$E^0(t)$ — упруго мгновенный модуль деформаций;

$C(t, t_0)$ — мера ползучести.

Примем закон изменения коэффициента поперечных деформаций в виде:

$$\nu = \frac{1}{2} \left[1 - (1 - 2\nu_0) \frac{E^e(\nu, t)}{E^0(t)} \right], \quad (13)$$

где ν_0 — коэффициент Пуассона.

Изменение внешней нагрузки, характерное для здания во время эксплуатации, примем по закону, показанному на рис. 4:

$$P(t) = \begin{cases} \alpha_i t P_i; & 0 \leq t \leq t_0; t_{i-1} < t \leq t_i \\ P_i; & t_0 < t \leq t_{i-1} \\ -\alpha_i t P_i; & t_i < t \leq t_{i+1} \end{cases} \quad (14)$$

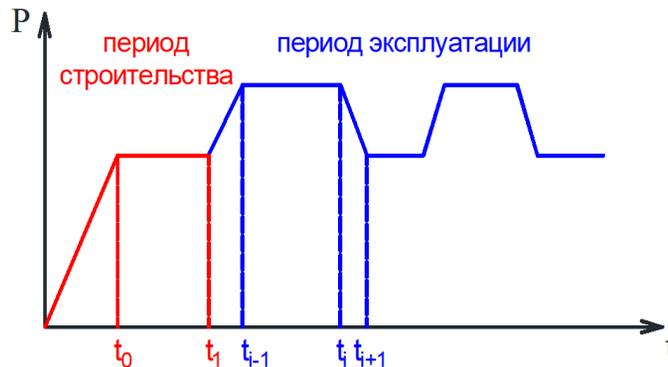


Рис. 4. График изменения внешней нагрузки

Fig. 4. Graph of external load changes

Заметим, что график, приведенный на рис. 4, является несколько идеализированным, однако реальное изменение внешней нагрузки может быть уточнено с помощью вероятностных методов, применяемых в современной строительной механике.

Совместное рассмотрение уравнений (1–4) и (7–12) превращает линейную задачу смешанного метода в нелинейную, решение которой в замкнутом виде встречает непреодолимые математические трудности. Поэтому для получения инженерно-обозримого решения в численном виде используется метод интегральных оценок [2], который позволяет линеаризовать задачу.

Сущность такого приема заключается в следующем. Весь процесс загрузки 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 упруголинейной постановке.

Во втором приближении по полученным значениям изгибающих моментов для каждого участка уточняются жесткости железобетонного сечения по методике, изложенной в [14], а по эпюре отпора грунта и эпюре касательных напряжений назначаются значения функций S , S' , ν и E^e для грунтового основания, т.е. уточняются значения единичных перемещений по формуле (8) и вновь производится решение задачи. Затем проводят третье приближение и так далее, до тех пор, пока разница между двумя соседними значениями δ не достигнет заранее заданной степени точности. В случае возникновения расходящегося итерационного процесса применяются известные математические приемы, улучшающие сходимость (метод редуцированных коэффициентов). Затем переходят к следующему фиксированному интервалу времени, для которого внешняя нагрузка изменится на некоторую величину, и вышеупомянутый вычислительный процесс повторяют снова и так далее, до тех пор, пока весь рассматриваемый временной интервал не будет исчерпан.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве иллюстрации изложенного метода расчета приведен пример гибкого ленточного фундамента жилого здания, показанный на рис. 5. Грунт основания имеет следующие физико-механические характеристики: $E_0(t) = 20$ МПа; $R = 0,25$ МПа; $\eta_m = 1,29$; $m = 2,48$; $\nu = 0,3$; $\eta_n = 2,3$; $c(t, t_0) = 0,00278 \frac{1}{\text{МПа}}$; $\gamma = 0,025 \frac{1}{\text{час}}$. Материал балки — бетон В30, ширина балки $b = 40$ см, высота $h = 60$ см, арматура класса А400. Параметры изменения внешней нагрузки $\alpha = 0,0007$; $t = 60$ дней; $P = 750$ кН и коррозионных повреждений арматуры $k = 1,62$; $n = 0,68$; толщина защитного слоя бетона $a = 30$ мм. Нелинейность сил трения в зоне контакта балки и основания, а также переменность коэффициента поперечных деформаций не учитывались. Расчет с некоторыми упрощениями проведен только для периода 10 и 50 лет эксплуатации здания (рис. 5).

Анализируя результаты расчета, можно сделать следующие выводы: при упруго линейной постановке задачи учет сил трения, возникающих по подошве гибкого фундамента, приводит к снижению максимального изгибающего момента до 4,8 %.

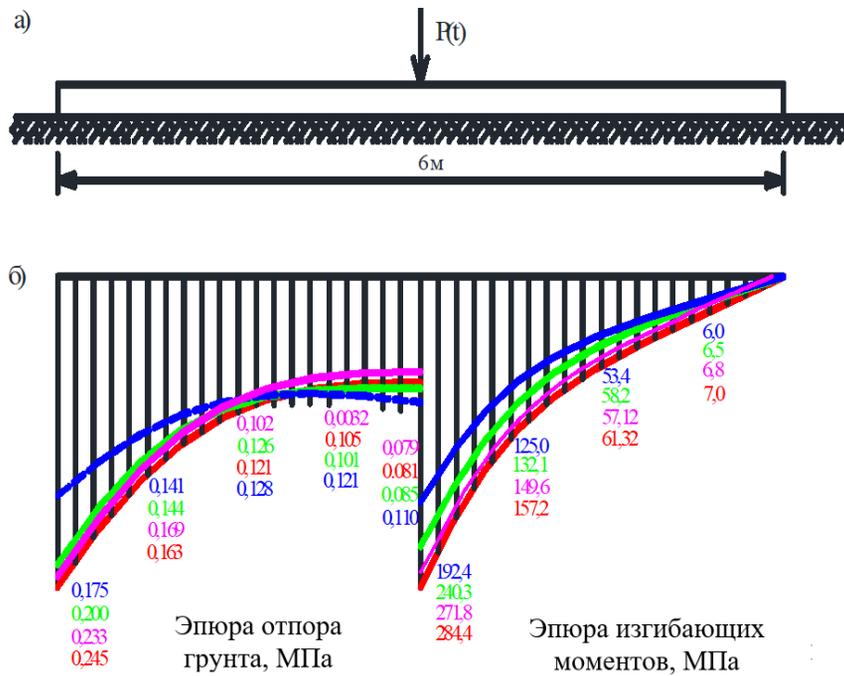


Рис. 5. Расчетная схема (а) и действующие усилия (б):

— упругая постановка задачи без учета сил трения в основании; — упругая постановка с учетом сил трения; — нелинейная и реологическая постановка с учетом средовых повреждений и при сроке эксплуатации 10 лет; — то же, при сроке эксплуатации 50 лет

Fig. 5. Calculation scheme (a) and operating forces (b):

— elastic formulation of the problem without taking into account the friction forces in the base; — elastic formulation taking into account the friction forces in the base; — nonlinear and rheological formulation taking into account environmental damage and the malleability of the base with a service life of 10 years; — the same, with a service life of 50 years

Учет сил трения, возникающих по подошве гибкого фундамента, нелинейности, реологии деформирования и коррозионных повреждений при режимном изменении внешней нагрузки приводит к незначительной 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 (рис. 5, б).

В условиях нелинейной и неравновесной постановки задачи с учетом режима действия внешней нагрузки и сил трения по подошве в основании и коррозионных повреждений при сроке эксплуатации 10 лет уменьшение максимальной ординаты эпюры моментов составило 15 %, а увеличение минимальной ординаты эпюры отпора грунта 5 %, при уменьшении максимальной — 18 %, по сравнению с упруго линейным расчетом. При нелинейной и неравновесной постановке задачи с учетом режима действия внешней нагрузки, податливости основания и коррозионных повреждений при сроке эксплуатации 50 лет уменьшение максимальной ординаты эпюры моментов составило соответственно 32 %, а увеличение минимальной ординаты эпюры отпора грунта — 26 %, уменьшение максимальной — 28 % по сравнению с упруго линейным расчетом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Любые решения, принимаемые по вопросу об использовании эксплуатируемых и вообще любого срока давности конструкций, требуют исчерпывающей информации о ресурсах их силового сопротивления. Это обусловлено тем, что вследствие возрастного износа и накоп-

ления неизбежных повреждений бетона и арматуры, следующих за длительным пребыванием в реальной, особенно в агрессивной, среде, ресурс их силового сопротивления снижается. Поэтому 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 железобетонных конструкций фундаментов и грунтов оснований с учетом средовых повреждений и режима внешних нагрузок даст возможность оценить конструктивную безопасность элементов и конструкций строительных объектов, оценивая ее коэффициентом конструктивной безопасности, который можно определить как отношение их силового сопротивления по несущей способности — по прочности и устойчивости (1-я группа предельных состояний) или по деформациям (2-я группа предельных состояний) к расчетным усилиям и деформациям от внешних нагрузок и воздействий. Предпочтительно такое проектирование зданий и сооружений, при котором устанавливается одинаковая конструктивная безопасность всех несущих элементов и здания и сооружения в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тамразян А.Г., Попов Д.С. Напряженно-деформированное состояние коррозионно-поврежденных железобетонных элементов при динамическом нагружении // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 2. С. 19–26.
2. Бондаренко В.М. Феноменология кинетики повреждений бетона и железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в агрессивной среде // Бетон и железобетон. 2008. № 2. С. 56–61.
3. Берлинов М.В., Берлинова М.Н. Длительная эксплуатация железобетонной балки на грунтовом основании с учетом коррозионных повреждений // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 1. № 1. С. 19–27.
4. Байдин О.В. О силовом сопротивлении железобетона, поврежденного коррозией // Вестник Белгородского государственного технологического университета им В.Г. Шухова. 2012. № 2. С. 11–14.
5. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона : монография. 2004. 112 с.
6. Путляев В.И., Берлинова М.Н. Оценка длительной прочности бетона в строительных конструкциях // Железобетонные конструкции. 2024. Т. 6. № 2. С. 12–21.
7. Степанова В.Ф., Степанов А.Ю. Коррозия и защита арматуры в бетонах на пористых заполнителях. М., 2016. 191 с.
8. 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.
9. Тамразян А.Г., Мацевич Т.А. Анализ надежности железобетонной плиты с корродированной арматурой // Строительство и реконструкция. 2022. № 1 (99). С. 89–98.
10. 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
11. Berlinov M., Berlinova M. Long-term durability of concrete structures // Journal of Physics: Conference Series. 2020. No. 1614 (1). P. 012006.
12. 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.
13. Гениев Г.А., Колчунов В.И., Ключева Н.В., Никулин А.И., Пятикрестовский К.П. Прочность и деформативность при запроектных воздействиях : монография. Издательство АСВ, 2004.
14. Берлинов М.В. Основания и фундаменты. СПб. : Издательство «Лань», 2022. 320 с.

REFERENCES

1. Tamrazyan A.G., Popov D.S. Stress-strain state of corrosion-damaged reinforced concrete elements under dynamic loading. *Industrial and civil construction*. 2019; 2:19-26. (in Russian).
2. Bondarenko V.M. Phenomenology of damage kinetics of concrete and reinforced concrete structures operated in an aggressive environment. *Concrete and reinforced concrete*. 2008; 2:56-61. (in Russian).

3. Berlinov M.V., Berlinova M.N. Long-term operation of a reinforced concrete beam on a soil base taking into account corrosion damage. *Reinforced concrete structures*. 2023; 1(1):19-27. (in Russian).
4. Baidin O.V. On the strength resistance of reinforced concrete damaged by corrosion. *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2012; 2:11-14. (in Russian).
5. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. Computational models of force resistance of reinforced concrete : monograph. 2004; 112. (in Russian).
6. Putlyayev V.I., Berlinova M.N. Estimation of the long-term strength of concrete in building structures. *Reinforced concrete structures*. 2024; 6(2):12-21. (in Russian).
7. Stepanova V.F., Stepanov A.Yu. Corrosion and protection of reinforcement in concrete on porous aggregates. Moscow, 2016; 191. (in Russian).
8. 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. (in Russian).
9. Tamrazyan A.G., Matseevich T.A. Analysis of the reliability of a reinforced concrete slab with corroded reinforcement. *Construction and reconstruction*. 2022; 1(99):89-98. (in Russian).
10. 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. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.05.15-27
11. Berlinov M., Berlinova M. Long-term durability of concrete structures. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1614(1):012006.
12. Berlinov M.V., Berlinova M.N., Tvorogov A.V., Pechkina E.K. Accounting for corrosion damage of exploited reinforced concrete structures in a three-axis stress-strain state. *Construction and architecture*. 2020; 8(3):40-46. (in Russian).
13. Geniev G.A., Kolchunov V.I., Klyueva N.V., Nikulin A.I., Pyatikrestovsky K.P. *Strength and deformativity under proek-design impacts : monograph*. ASV Publishing House, 2004. (in Russian).
14. Berlinov M.V. *Foundations and foundations*. St. Petersburg, Publishing house "Lan", 2022; 320. (in Russian).