

НЕКОТОРЫЕ СООБРАЖЕНИЯ О ПОСТРОЕНИИ СОВРЕМЕННОЙ ТЕОРИИ РАСЧЕТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ (ПРОДОЛЖЕНИЕ)

В.Г. НАЗАРЕНКО, д-р техн. наук

А.И. ЗВЕЗДОВ[✉], д-р техн. наук

Е.А. ЛАРИОНОВ, д-р техн. наук

АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, г. Москва, 109428, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Статья развивает результаты исследования, опубликованного авторами ранее, применив их для построения нелинейной диссипативной теории силового сопротивления бетона сжатию. Авторами статьи решается важная и актуальная задача, направленная на совершенствование теории расчета бетонных и железобетонных конструкций с учетом накопленных к настоящему моменту знаний.

Цель. Показать возможный путь построения нелинейной диссипативной теории силового сопротивления бетона сжатию в условиях отсутствия нормативных режимов нагружения, используя вместо них нормативную классификацию нагрузок.

Результаты. Уравнение состояния теории упруго-ползучего тела, наиболее точной из существующих на сегодня, но и наиболее трудоемкой в практическом использовании, без потери ее положительных свойств, сведено по форме к уравнению нестареющего бетона с его простотой в применении. При этом уравнение состояния бетона в практически важных случаях разрешается в элементарных функциях и замкнутом виде.

Подавляющее большинство известных в научной литературе о железобетоне сведений о характере кривых ползучести в области надежной работы конструкций свидетельствует об их гладкости и непрерывности. Это дает основание для распространения данных, полученных при кратковременных испытаниях, на весь временной интервал, открывая возможность экспресс-анализа дерформативных свойств бетона.

Приведена оценка обратимости деформаций ползучести. Обнаружена диссипативность упругих деформаций. Построена нелинейная связь деформации с постоянным уровнем напряжения, на основе которой показан возможный путь построения нелинейной диссипативной теории силового сопротивления бетона сжатию в условиях отсутствия нормирования режимов нагружения, используя вместо них нормативную классификацию нагрузок.

Выводы. В заключение отмечается, что рассмотренные экспериментальные данные в связи с их малочисленностью дают качественную информацию. Количественную оценку можно получить, проведя необходимое количество воспроизведенных опытов.

Ключевые слова: теория расчета, бетон, ползучесть бетона, нагрузки, релаксация, уровень нагружения, деформация, силовое сопротивление, простое нагружение

Для цитирования: Назаренко В.Г., Звездов А.И., Ларионов Е.А. Некоторые соображения о построении современной теории расчета железобетонных конструкций (продолжение). *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2023;38(3):37–45. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3\(38\)-37-45](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-37-45)

Вклад авторов

Авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 20.06.2023

Поступила после рецензирования 19.07.2023

Принята к публикации 25.07.2023

CALCULATION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES: CONSIDERATIONS ON DEVELOPING NEW THEORY (CONTINUED)

V.G. NAZARENKO, Dr. Sci. (Engineering)

A.I. ZVEZDOV✉, Dr. Sci. (Engineering)

E.A. LARIONOV, Dr. Sci. (Engineering)

JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, Moscow, 109428, Russian Federation

Abstract

Introduction. The authors develop the results of their previously published study in order to build up a nonlinear dissipative theory of concrete compressive strength. The present paper explores possibilities to improve the theory of calculation of concrete and reinforced concrete structures in the light of the accumulated knowledge.

Aim. To introduce an approach to developing a nonlinear dissipative theory of concrete compressive strength in the absence of regulatory documents for loading modes, using instead the standard classification of loads.

Results. The authors refer to the non-linear hereditary creep theory as the most accurate but time-consuming, and keeping its positive properties, reduce its equation of state to the equation of ageless concrete with its simplicity in application. In addition, the equation of state of concrete is solved in elementary functions and closed form in practically important cases.

The overwhelming majority of published scientific data on the behavior of creep curves in the area of reliable performance of reinforced concrete structures indicates smoothness and continuity of the curves. Considering that, the data obtained in short-term tests can be extended to the whole time interval, thus providing possibility for express analyses of the strain properties of concrete.

The study estimated the reversibility of creep strain and found out dissipativity of elastic strain. The authors established a nonlinear relation between strain and constant stress and introduced an approach to developing a nonlinear dissipative theory of concrete compressive strength in the absence of regulatory documents for loading modes, using instead the standard classification of loads.

Conclusions. The considered experimental data were recognized to provide qualitative information due to their apparent deficit. In order to obtain quantitative evaluation, the experiments should be reproduced a sufficient number of times.

Keywords: calculation theory, concrete, concrete creep, loads, relaxation, loading level, strain, force resistance, simple loading

For citation: Nazarenko V.G., Zvezdov A.I., Larionov E.A. Calculation of reinforced concrete structures: considerations on developing new theory (continued). *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2023;38(3):37–45. [In Russian]. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3\(38\)-37-45](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-37-45)

Author contribution statements

All authors made equal contributions to the study and the publication.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 20.06.2023

Revised 19.07.2023

Accepted 25.07.2023

В линейной постановке зависимость деформации от уровня напряжений сжатия при простейшем нагружении призмы [1]:

$$\varepsilon(t, \tau) = \eta(\tau) \varepsilon_R [1 + \varphi f(t - \tau)], \quad (1)$$

где $f(t - \tau) = 1 - ke^{-\gamma(t - \tau)}$ – функция накопления деформаций;

$\varepsilon_R = \frac{R(28)}{E(28)}$ – предельная сжимаемость бетона в возрасте 28 суток.

Принятая запись функции накопления деформаций ползучести в момент нагружения определяет восходящий участок прямой графика меры ползучести, который реализуется за несопоставимо короткий отрезок времени по сравнению со временем эксплуатации конструкции, когда проявляется сама ползучесть. Этот участок сейчас относят к ползучести и называют ее быстронатекающей, отнеся ее к необратимым деформациям. Е. Н. Щербаков называл меру ползучести мерой в начальных отрезках.

Эволюция деформаций определяется дифференциальным соотношением

$$d\varepsilon(t, \tau) = d\eta(\tau) \varepsilon_R [1 + \varphi f(t - \tau)], \quad (2)$$

которое является ОДУ первого порядка, решая которое прямым интегрированием, получаем уравнение для деформаций в зависимости от изменения уровня напряжений во времени

$$\varepsilon(t, t_0) = a\eta(t_0) - b\eta(t) + be^{-\gamma t} \int_{t_0}^t e^{\gamma \tau} \frac{\partial \eta(\tau)}{\partial \tau} d\tau, \quad (3)$$

где $a = \varepsilon_R(1 + \varphi)$ и $b = \varepsilon_R k \varphi$. Если взять интеграл по частям, то получим

$$\varepsilon(t, t_0) = \varepsilon_R \eta(t_0) [1 + \varphi f(t - t_0)] - be^{-\gamma t} \int_{t_0}^t \eta(\tau) \frac{\partial e^{\gamma \tau}}{\partial \tau} d\tau, \quad (3a)$$

Обычно в научной литературе это уравнение называют уравнением механического состояния. Решая (2) относительно уровней напряжения, получаем уравнение релаксации

$$\eta(t) \varepsilon_R = \int_{t_0}^t \frac{1}{[1 + \varphi f(t - \tau)]} \frac{\partial \varepsilon(t, \tau)}{\partial \tau} d\tau + \frac{\varepsilon(t, t_0)}{[1 + \varphi f(t - t_0)]}. \quad (4)$$

Таким образом, уравнение состояния теории упруго-ползучего тела, наиболее точной из существующих на сегодня, но и наиболее трудоемкой в практическом использовании,

без потери ее положительных свойств, сведено по форме к уравнению нестареющего бетона (3) с его простотой в практическом применении. Уравнения (3), (4) в практически важных случаях разрешаются в элементарных функциях и замкнутом виде.

Последние опытные данные, полученные в НИИЖБ им. А. А. Гвоздева Е. Н. Паньковым при уровне напряжений, в соответствии с ГОСТ 24452 [2] и ГОСТ 24544 [3], равном 0,33 показывают, что упругие деформации наряду с известным свойством нелинейности [1] рассеивают энергию. Это отчетливо видно на рис. 1. График (рис. 1) построен для начального нагружения призмы за 30 секунд до уровня 0,33 от ее прочности, выдержки на этом уровне 24 минуты и сбросе всей нагрузки в течение 22 секунд.

На графике (рис. 2) отдельно показано развитие упругих деформаций, из которого видно, что в интервале времени 14–58 секунд упругие деформации симметричны относительно максимума, что свидетельствует об их обратимости на этом интервале.

Вне его они необратимы. Коэффициент необратимости равен $4E-05/3.6E-04 = 0,11$.

Рассеивают энергию и деформации ползучести. Это также известный факт. Вопрос только в ее количестве. Если в существующих теориях оно оценивается около 20 %, то, по данным Е. Н. Панькова, составляет больше половины (см. следующие графики – рис. 3, 4).

График на рис. 4 показывает, что коэффициент необратимости постоянен во времени. Это свидетельствует об аффинноподобии кривых мер полных, обратимых и необратимых деформаций. А это, в свою очередь, «приводит к весьма важному в практическом отношении следствию о возможности инвариантного учета основных факторов, влияющих на изменение частных деформаций» [4]. Из сопоставления графиков видно, что в рассматриваемом опыте необратимость упругих деформаций почти в пять раз меньше необратимости деформаций ползучести.

Подавляющее большинство известных в научной литературе о железобетоне сведений о характере кривых ползучести в области надежной работы конструкций свидетельствуют

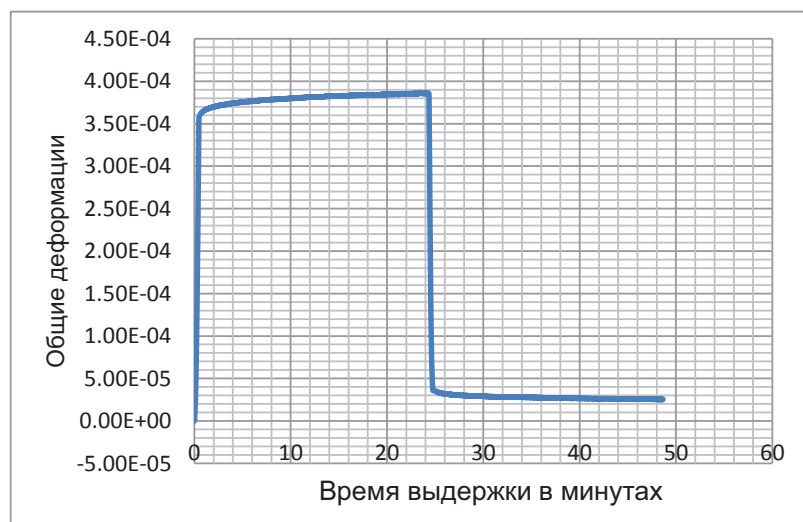


Рис. 1. Развитие деформаций в уровнях 0–0,33–0
Fig. 1. Development of strain at 0–0, 33–0



Рис. 2. Развитие упругих деформаций
Fig. 2. Development of elastic strain

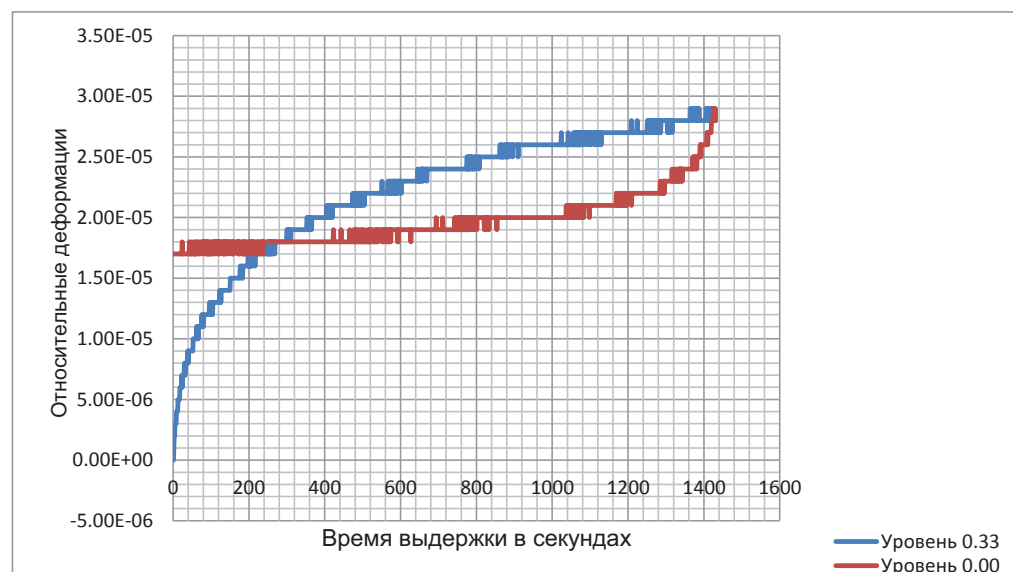


Рис. 3. Ползучесть на уровнях 0,33–0
Fig. 3. Creep at 0.33–0

об их гладкости и непрерывности. Это дает основание для распространения данных, полученных при кратковременных испытаниях, на весь временной интервал, открывая возможность экспресс-анализа деформативных свойств бетона.

В заключение этой части отмечаем, что рассмотренный эксперимент дает качественную информацию. Количественную оценку можно получить, проведя необходимое количество воспроизведений опыта.

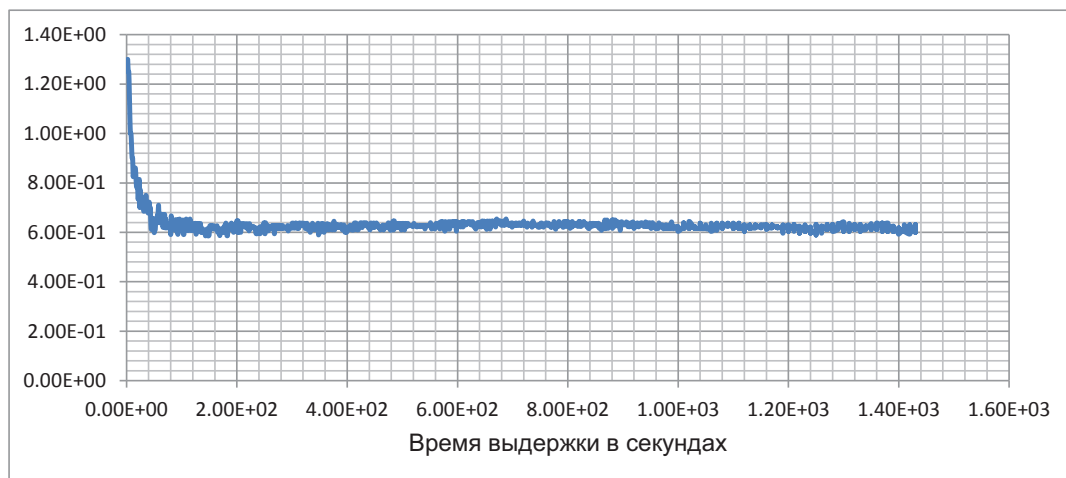


Рис. 4. Коэффициент необратимости деформаций ползучести на уровне напряжения 0,33
Fig. 4. Irreversibility coefficient of creep strain at 0.33 stress

При построении нелинейной теории следует всего лишь в (1) уровень напряжения $\eta(\tau)$ помножить на функцию нелинейности. В связи с этим приводим цитату В. М. Бондаренко: «В литературе приводится множество различных записей для функции нелинейности; каждый раз введение новых предложений мотивируется какими-нибудь локальными причинами; среди них обычно фигурируют соображения точности аппроксимации экспериментальных данных, хотя чаще всего достоверность ожидаемой точности не доказывается» [5]. Анализ этих предложений выявил предпочтительные, которые в итоге и были заложены в «Рекомендации по учету ползучести и усадки бетона при расчете бетонных и железобетонных конструкций. НИИЖБ, 1988» [6]. С учетом результатов [7–9], принимая усредненную функцию нелинейности,

$$S^0(\eta(\tau)) = [1 + \nu(\eta(\tau))^m], \quad (5)$$

получим нелинейную связь деформации при постоянном уровне напряжения

$$\varepsilon(t, \tau) = \eta(\tau) \varepsilon_R [1 + \varphi f(t - \tau)] + \left(\frac{\sigma(t)}{R(t)} \right)^{m+1} \nu \varepsilon_R [1 + \varphi f(t - \tau)], \quad (6)$$

где $\varphi = E(28)C(\infty, 28)$;

ν и m – параметры нелинейности.

Первое слагаемое в (6) представляет величину обратимых (потенциальных) деформаций, второе выражает величину необратимых омертвленных (диссипативных) деформаций, которые накапливаются достаточно быстро. По данным К. З. Галустова – за 40–50 суток, по данным В. В. Соломонова – за 5 суток. Предпосылка о том, что нелинейная часть (6) необратима, признается в научной литературе, однако в [7, 10] полагается, что она необратима частично, в [11] – необратима полностью, в [12] утверждается, что [7, 10, 11] не дают строгого аналитического решения уравнения при отыскании необратимой деформации и неприемлемы при решении релаксационной задачи. Заметим, что собственные публикации, на которые ссылается [12], заканчиваются в 1986 году.

Позднее А. А. Котов, опираясь на исследования В. Д. Харлаба (1981, 1983, 1996 гг.), фактически принимая основной принцип двухкомпонентной теории ползучести, говорит: «Естественным с физической точки зрения выглядит изначальное разделение процессов ползучести на обратимые и необратимые. Отсюда начальный постулат о структуре деформации ползучести предлагается формулировать так: полная деформация складывается из мгновенно упругой и деформаций, развивающихся во времени: полностью обратимой и полностью необратимой. Обратимая деформация является результатом вязкого течения материала, происходящего без нарушения структурных связей, определяющих потенциальную прочность материала, и поэтому обратима. Необратимая деформация отражает процесс постепенного разрушения этих связей под воздействием напряжений и поэтому необратима. Обратимая деформация ползучести не может быть ничем иным, как наследственно упругой деформацией, соответствующей принципу суперпозиции Больцмана – Вольтерра (обратимость гарантируется наследственной упругостью, а наследственная упругость предполагает линейность» [8].

Из этого непосредственно следует, что необратимые деформации равны разности общих и линейной частей деформаций, а это и есть нелинейная часть деформаций согласно (6). Приведенный выше обзор исследований показывает необходимость дополнительной экспериментальной проверки. Согласно [12], величина необратимых деформаций определяется максимальным уровнем напряжения с учетом всех сочетаний нагрузок в интервале τ, t . Уравнение (6) позволяет способом, используемым в линейной постановке, построить уравнения деформаций и релаксации при переменном уровне напряжений или вынужденных деформаций.

За исследованиями этого направления можно обратиться к [9] и там увидеть, что требуется иметь режимы нагружений, которых, как известно, великое множество и которые не содержатся пока в действующих нормах. Как говорил Д. Поля: «Пока никто не достиг Полярной звезды, но многие, глядя на нее, находили правильный путь». Один из путей можно найти, если интегрирование заменить простой суммой. Число членов в той сумме невелико. Согласно действующим нормам, в большинстве случаев нагрузки делятся на постоянные, временные длительные и временные кратковременные. Поэтому в функции $f(t - \tau) = 1 - ke^{-\gamma(t - \tau)}$ для обратимых деформаций аргумент можно принять равным бесконечности для первых и вторых видов нагрузок, нулю – для третьего вида и для необратимой части деформаций.

Список литературы

1. Назаренко В.Г., Звездов А.И., Ларионов Е.А. Некоторые соображения о построении современной теории расчета железобетонных конструкций. Вестник НИЦ «Строительство». 2022;35(4):80–87. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-4\(35\)-80-87](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-4(35)-80-87)
2. ГОСТ 24452-80. Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона. Москва: Стандартинформ; 2005.
3. ГОСТ 24544-81. Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести [интернет]. Режим доступа: <https://gostrf.com/normadata/1/4294853/4294853100.pdf> ГОСТ отменен. Новый: ГОСТ 24544-2020 <https://gostassistant.ru/doc/11cdb233-16b3-42f5-a5a2-eb600f3edcf7>
4. Бондаренко В.М., Бондаренко С.В. Инженерные методы нелинейной теории железобетона. Москва: Стройиздат; 1982.
5. Бондаренко В.М. Диалектика механики железобетона. Бетон и железобетон. 2002;(1):24–27.

6. НИИЖБ Госстроя СССР. Рекомендации по учету ползучести и усадки бетона при расчете бетонных и железобетонных конструкций. Москва: Стройиздат; 1988. 120 с.
7. Александровский С.В., Попкова О.М. Исследование нелинейных деформаций бетона молодого возраста при ступенчато изменяющихся напряжениях сжатия. В: Ползучесть и усадка бетона. Материалы Совещания, Киев, 1969 г. Москва: Стройиздат; 1969, с. 30–52.
8. Котов А.А. К теории ползучести и длительной прочности бетона. Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2002;5(2):161–166.
9. Барашиков А.Я. Исследование длительной работы железобетонных конструкций при переменных нагрузках [диссертация]. Киев; 1978.
10. Колесников Н.А. Исследование нелинейной ползучести и релаксации напряжений в бетоне при повторных воздействиях напряжений или деформаций сжатия [диссертация]. Москва; 1970.
11. Соломонов В.В. Исследование предшествующего процесса деформирования на линейные и нелинейные деформации ползучести бетона при постоянных и переменных напряжениях сжатия [диссертация]. Москва; 1973.
12. Галустов К.З. Нелинейная теория ползучести бетона и расчет железобетонных конструкций. Москва: Физматлит; 2006.
13. Назаренко В.Г. Развитие основ теории расчета железобетонных конструкций с учетом особенностей режимного нагружения [диссертация]. Москва; 1990.
14. Бондаренко С.В., Назаренко В.Г. Методика теории ползучести. Москва: ВЗИСИ; 1981.

References

1. Nazarenko V.G., Zvezdov A.I., Larionov E.A. Calculation of reinforced concrete structures: considerations on developing new theory. Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2022;35(4):80–87. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-4\(35\)-80-87](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-4(35)-80-87)
2. State Standard 24452-80. Concretes. Methods of prismatic, compressive strength, modulus of elasticity and Poisson's ratio determination. Moscow: Standartinform; 2005. (In Russian).
3. State Standard 24544-81. Concretes. Methods of shrinkage and creep flow determination [internet]. Available at: <https://gostrf.com/normadata/1/4294853/4294853100.pdf> (in Russian).
4. Bondarenko V.M., Bondarenko S.V. Engineering methods of nonlinear theory of reinforced concrete. Moscow: Stroizdat Publ.; 1982. (In Russian).
5. Bondarenko V.M. Dialectics of reinforced concrete mechanics. Beton i zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete. 2002;(1):24–27. (In Russian).
6. NIIZHB Gosstroy of the USSR. Recommendations on accounting for creep and shrinkage of concrete when calculating concrete and reinforced concrete structures. Moscow: Stroyizdat; 1988. 120 p.
7. Alexandrovsky S.V., Popkova O.M. Investigation of nonlinear deformations of young concrete under stepwise varying compression stresses. In: Creep and shrinkage of concrete. Materials of the Meeting, Kiev, 1969. Moscow: Stroyizdat; 1969, pp. 30–52. (In Russian).
8. Kotov A.A. On the theory of creep and long-term strength of concrete. Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of MSTU. 2002;5(2):161–166. (In Russian).
9. Barashikov A.Ya. Investigation of long-term operation of reinforced concrete structures under variable loads [dissertation]. Kyiv; 1978. (In Russian).
10. Kolesnikov N.A. Investigation of nonlinear creep and stress relaxation in concrete under repeated effects of stress or compression deformations [dissertation]. Moscow; 1970. (In Russian).
11. Solomonov V.V. Investigation of the previous deformation process on linear and nonlinear creep deformations of concrete under constant and variable compression stresses [dissertation]. Moscow; 1973. (In Russian).
12. Galustov K.Z. Nonlinear theory of concrete creep and calculation of reinforced concrete structures. Moscow: Fizmatlit Publ.; 2006. (In Russian).
13. Nazarenko V.G. Development of the fundamentals of the theory of calculation of reinforced concrete structures taking into account the peculiarities of regime loading [dissertation]. Moscow; 1990. (In Russian).
14. Bondarenko S.V., Nazarenko V.G. Methodology of the theory of creep. Moscow: VZISI; 1981. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Виталий Григорьевич Назаренко, д-р техн. наук, профессор, АО «НИЦ «Строительство», Москва
Vitaly G. Nazarenko, Dr. Sci. (Engineering), Professor, JSC Research Center of Construction, Moscow

Андрей Иванович Звездов✉, д-р техн. наук, профессор, заместитель генерального директора по научной работе АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail.: zvezdov@list.ru

Andrey I. Zvezdov✉, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Deputy General Director for Academic Affairs, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail.: zvezdov@list.ru

Евгений Алексеевич Ларионов, д-р техн. наук, профессор, АО «НИЦ «Строительство», Москва
Evgeny A. Larionov, Dr. Sci. (Engineering), Professor, JSC Research Center of Construction, Moscow

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author