

УДК 624.046.4

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-1\(36\)-86-98](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-1(36)-86-98)

EDN: LMVDU

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РЕЛАКСАЦИИ БЕТОНА В РАЗНЫХ РЕЖИМАХ

П.Д. АРЛЕНИНОВ^{1,2,✉}, канд. техн. наук

С.Б. КРЫЛОВ¹, д-р техн. наук

П.С. КАЛМАКОВА¹

А.В. ДОНОВ³

¹Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 5, г. Москва, 109428, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» Минобрнауки России (НИУ МГСУ), Ярославское шоссе, д. 26, г. Москва, 129337, Российская Федерация

³Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники (ВНИИГ) имени Б.Е. Веденеева, ул. Гжатская, д. 21, Санкт-Петербург, 195220, Российская Федерация

Аннотация

Введение. В настоящее время при проведении длительных испытаний бетонных образцов под нагрузкой основным определяемым параметром является ползучесть бетона. При этом ползучесть является только одним из деформационных свойств бетонного образца при работе под действием длительной нагрузки. Другим важным свойством является релаксация напряжений, причем в отдельных задачах (температурные задачи, задачи, связанные с перераспределением усилий, и т.д.) релаксация играет более важную роль, чем ползучесть. Внедрение новой методики испытаний позволит повысить точность полученных результатов (при стандартных испытаниях на ползучесть релаксация бетона определяется только математически), что, в свою очередь, даст возможность повысить точность расчетов.

Цель. Разработка методики проведения испытаний образцов бетона с определением в них релаксации напряжений.

Материалы и методы. В статье описывается методология постановки эксперимента по исследованию релаксации бетонных образцов в режиме «сжатие» и в режиме «изгиб», описываются параметры испытательных установок, испытываемых образцов и принципы передачи нагрузки.

Результаты. В статье в графическом виде приведены основные результаты проведенных экспериментальных исследований. Выполнен их анализ, а также произведена оценка удобства проведения таких испытаний.

Выводы. Показана перспективность предложенного подхода к испытанию бетонных образцов, подготовлены рекомендации по внесению изменений в ГОСТ 24544.

Ключевые слова: бетон, железобетон, ползучесть, релаксация, длительные испытания

Для цитирования: Арленинов П.Д., Крылов С.Б., Калмакова П.С., Донов А.В. Экспериментальные исследования процесса релаксации бетона в разных режимах. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2023;36(1):86–98. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-1\(36\)-86-98](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-1(36)-86-98)

Вклад авторов

Арленинов П.Д. – общее руководство, анализ результатов, подготовка статьи.

Крылов С.Б. – анализ результатов, подготовка статьи.

Калмакова П.С. – анализ результатов.

Донов А.В. – лабораторные испытания.

Финансирование

В рамках проведения НИОКР по договору с ФАУ «ФЦС».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 31.01.2023

Поступила после рецензирования 27.02.2023

Принята к публикации 07.03.2023

EXPERIMENTAL STUDIES OF CONCRETE RELAXATION IN VARIOUS MODES

P.D. ARLENINOV^{1,2,✉}, Cand. Sci. (Engineering)

S.B. KRYLOV¹, Dr. Sci. (Engineering)

P.S. KALMAKOVA¹

A.V. DONOV³

¹Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) named after A.A. Gvozdev,
JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 5, Moscow, 109428, Russian Federation

²Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), 26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

³All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering (VNIIG) named after B.E. Vedenev, 21, Gzhatskaya str.,
St. Petersburg, 195220, Russian Federation

Abstract

Introduction. At present, creep is the main parameter determined in the long-term loading tests of concrete samples. However, creep appears to be only one of the deformation properties of a concrete sample during operation under the action of long-term loading. Another important property involves stress relaxation. Moreover, in individual problems (temperature problems, force redistribution problems, etc.), stress relaxation plays a more important role than creep. The introduction of a new test procedure can improve the accuracy of the obtained results (in standard creep tests, concrete relaxation is determined only mathematically), which in turn will increase the accuracy of calculations.

Aim. To develop a procedure for testing concrete samples with the determination of their stress relaxation.

Materials and methods. The article describes a methodology for conducting an experiment to study the relaxation of concrete samples in compression and bending modes, as well as the parameters of test benches, samples and the principles of load transfer.

Results. The main results of experimental studies are presented graphically. An analysis of the results obtained was carried out; the convenience of conducting tests was evaluated.

Conclusion. The prospects of the proposed approach for testing concrete samples are demonstrated, and recommendations for amending GOST 24544 are prepared.

Keywords: concrete, reinforced concrete, creep, relaxation, long-term tests

For citation: Arleninov P.D., Krylov S.B., Kalmakova P.S., Donovan A.V. Experimental studies of concrete relaxation in various modes. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2023;36(1):86–98. (In Russ.). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-1\(36\)-86-98](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-1(36)-86-98)

Author contribution statements

Arleninov P.D. – general management, analysis of results, article preparation.

Krylov S.B. – analysis of results, article preparation.

Kalmakova P.S. – analysis of results.
Donov A.V. – conducting laboratory tests.

Funding

The research was supported as part of R&D under the contract with the FAA “FCS”.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 31.01.2023

Revised 27.02.2023

Accepted 07.03.2023

Введение

В настоящее время как в нашей стране, так и за рубежом при проведении длительных испытаний под нагрузкой основным параметром, который определяется по результатам этих испытаний, является ползучесть бетона. Это регламентирует как отечественный ГОСТ [1], так и зарубежные стандарты [2–4].

При этом ползучесть бетона является только одним из деформационных свойств бетонного образца при работе под действием длительной нагрузки. Другим важным свойством является релаксация напряжений.

Испытания бетонных образцов на ползучесть имеют два серьезных недостатка. Первый – необходимость постоянно проверять, что в испытательной установке поддерживается неизменная сжимающая сила. А поскольку это условие нарушается, то необходимо все время корректировать величину сжимающего усилия. Вторым недостатком – испытательная установка достаточно сложна. В результате такие испытания могут проводить всего лишь несколько организаций в нашей стране. Для испытаний на релаксацию потребуются более простые установки, в которых поддерживаются заданные деформации образцов, измеряются усилия в образцах. Постоянный контроль и обслуживание таких установок во время испытаний не требуются. Это позволяет повысить точность результатов и существенно упростить испытания, сделать их более доступными.

В температурных задачах и задачах, связанных с перераспределением усилий, релаксация играет более важную роль, чем ползучесть. При выполнении таких расчетов сначала определяется мера ползучести бетона, затем через меру ползучести определяется ядро ползучести, а через ядро ползучести определяется ядро релаксации, через которое уже определяются прогнозируемые напряжения в бетоне в произвольный момент времени.

Внедрение новой методики испытаний позволит повысить точность полученных результатов, что, в свою очередь, даст возможность повысить точность расчетов, при этом с достаточной надежностью приведет к удешевлению конструкции. Упрощение способа испытаний позволит выполнять их более широко. В свою очередь, это позволит получать объективные данные о свойствах бетонов в широком диапазоне составов и прочностей. В связи с этим рассматриваемая тема является актуальной и нужной для развития современной строительной отрасли.

Подобные исследования не проводились ни в нашей стране, ни за рубежом. Поэтому методика проведения предложенных испытаний и результаты этих испытаний являются новыми.

Материалы и методы

Математическое описание процесса релаксации бетона

Явление релаксации тесно связано с явлениями ползучести и усадки бетона, поэтому для понимания природы релаксации необходимо также детально исследовать процессы усадки и ползучести. Математические зависимости, описывающие процессы ползучести и релаксации, также между собой тесно связаны.

Мера ползучести бетона при сжатии C_b применяется для определения деформации ползучести в зависимости от напряжения в бетоне:

$$\varepsilon_{pl} = C_b \times \sigma_b, \quad (1)$$

$$C_b = \frac{\varepsilon_{pl}}{\sigma_b} = \frac{\varepsilon_{pl}}{\varepsilon_e \times E_b} = \varphi / E_b, \quad (2)$$

$$\varphi = \frac{\varepsilon_{pl}}{\varepsilon_e}. \quad (3)$$

Мера ползучести бетона зависит от его класса, уровня напряжений и является переменной во времени. Если рассматривать сжатый или растянутый стержень, выполненный из материала, обладающего упругими свойствами, ползучестью, а также старением, и считать, что деформации $\varepsilon^*(t)$ известны, то приведенные ниже зависимости можно трактовать как уравнения относительно неизвестных $\sigma^*(\tau)$, $\sigma^*(t)$, $E(t)$.

$$\varepsilon^*(t) = \frac{\sigma^*(t)}{E(t)} + \int_{\tau_1}^t \sigma^*(\tau) \frac{d\delta(t, \tau)}{dt} d\tau, \quad (4)$$

$$\varepsilon^*(t) = \frac{\sigma^*(t)}{E(t)} + \int_{\tau_1}^t \frac{\sigma^*(\tau)}{E(\tau)} L(t, \tau) d\tau, \quad (5)$$

где t – возраст бетона, сут;

τ – начальный возраст бетона (возраст загрузки), сут;

$\sigma^*(\tau)$ – нормальные напряжения, вызванные мгновенными вынужденными относительными деформациями.

В стержне, жестко заделанном по концам, относительные деформации в задаче релаксации остаются постоянными, то есть:

$$\varepsilon^*(t) = \varepsilon_0. \quad (6)$$

$$\varepsilon^*(t) = \frac{\sigma^*(t)}{E(t)} + \int_{\tau_1}^t \frac{\sigma^*(\tau)}{E(\tau)} L(t, \tau) d\tau = \varepsilon_0. \quad (7)$$

Из теории ползучести известно, что ядро ползучести имеет вид

$$L(t, \tau) = -E(\tau) \frac{d\delta(t, \tau)}{d\tau}.$$

Учитывая, что напряжения будут определяться постоянными относительными деформациями и текущим модулем упругости, после ряда преобразований выражение для напряжения также приобретает вид:

$$\sigma^*(t) - E(t) \int_{\tau_1}^t \sigma^*(\tau) \frac{d\delta(t, \tau)}{d\tau} d\tau = \sigma(t). \quad (8)$$

При постоянных вынужденных деформациях $\varepsilon_0(t) = \varepsilon_0 = const$ и неравенстве $E(t) > E(\tau)$ следует, что при $t > \tau_1$

$$\sigma(t) < \sigma(\tau_1). \quad (9)$$

Уменьшение во времени напряжений, возникающих при неизменных деформациях образца или конструкции, принято называть **релаксацией**. При этом процесс релаксации напряжений протекает как при постоянных, так и при переменных деформациях.

С механической точки зрения процесс релаксации напряжений можно объяснить таким образом. При введении постоянных вынужденных деформаций возникают напряжения $\sigma(\tau_1)$ пропорциональные соответствующим упруго мгновенным деформациям. В условиях сохранения значений полных деформаций развитие ползучести приводит к уменьшению упруго мгновенных деформаций и, естественно, напряжений. Если стержень выполнен из материала, обладающего ползучестью и старением, то величина релаксации напряжений зависит как от деформаций, так и от продолжительности процесса нагружения.

Обозначим $p(t, \tau)$ напряжение, необходимое для поддержания в призматическом образце в любой момент t единичной относительной деформации при загрузении образца в момент времени τ . Тогда в начальный момент времени $t = \tau$

$$p(t, \tau) = E(\tau) \quad (10)$$

Характер семейства кривых $p(t, \tau)$ показан на рис. 1.

$$\sigma^*(t) = \varepsilon(\tau_1) p(t, \tau_1) - \int_{\tau_1}^t \frac{d\varepsilon^*(\tau)}{d\tau} p(t, \tau) d\tau. \quad (11)$$

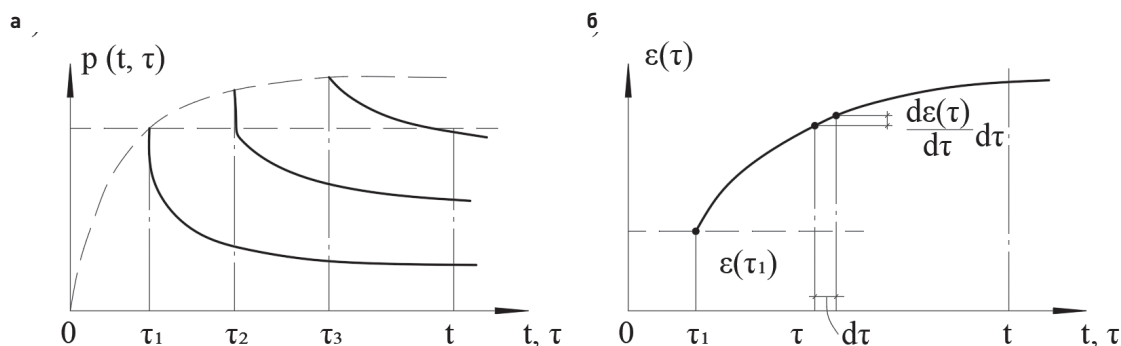


Рис. 1. Графики функции $p(t, \tau)$ (а) и относительных деформаций $\varepsilon(t)$ (б)
 Fig. 1. Plots of the $p(t, \tau)$ function (a) and relative deformations $\varepsilon(t)$ (b)

Преобразования позволяют представить уравнение в форме:

$$\frac{\sigma^*(t)}{E(t)} = \varepsilon^*(t) - \int_{\tau_1}^t \varepsilon^*(\tau) R(t, \tau) d\tau. \quad (12)$$

Причем функция $R(t, \tau)$, являющаяся ядром релаксации, определяется по формуле:

$$R(t, \tau) = \frac{1}{E(t)} \frac{dp(t, \tau)}{d\tau}. \quad (13)$$

Эта функция является резольвентой уравнения ползучести.

Таким образом, в линейной теории ползучести существуют две формы зависимости между напряжениями и деформациями:

$$\varepsilon^*(t) = \frac{\sigma^*(t)}{E(t)} + \int_{\tau_1}^t \frac{\sigma^*(\tau)}{E(\tau)} L(t, \tau) d\tau \quad (14)$$

или

$$\varepsilon^*(t) = \frac{\sigma^*(t)}{E(t)} + \int_{\tau_1}^t \sigma^*(\tau) \frac{d\delta(t, \tau)}{d\tau} d\tau \quad (15)$$

и

$$\frac{\sigma^*(t)}{E(t)} = \varepsilon^*(t) - \int_{\tau_1}^t \varepsilon^*(\tau) R(t, \tau) d\tau, \quad (16)$$

где $\delta(t, \tau)$ – полная относительная деформация. Функция $\delta(t, \tau)$ строится по данным опытов, выполняемых при постоянных напряжениях, а $[p(t, \tau)]$ – при постоянных относительных деформациях. Экспериментальные данные для ядра ползучести получают значительно чаще, чем для ядра релаксации. Такие эксперименты практически не ставятся. Приведенная ниже методика экспериментального определения параметров релаксации как раз нацелена на получение данных параметров.

Постановка эксперимента

В рамках данного исследования был проведен комплекс длительных испытаний. Исследования проводились на экспериментальной площадке АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева». Одновременно были задействованы следующие испытательные установки, часть из них уникальна и специально разработана и изготовлена под данное исследование:

– установки для определения ползучести бетонных призм при сжатии. Это стандартные пружинные установки, на которых выполняются такие испытания;

– установки для определения релаксации бетонных призм при сжатии. Такие установки были подготовлены путем разбора пружинных установок для испытаний на ползучесть с удалением в них пружин для фиксации требуемых начальных деформаций (рис. 2–3);

– совмещенные установки для определения релаксации или ползучести при изгибе. Такие установки были подготовлены путем модернизации существующих установок стеллажного типа для проведения испытаний на ползучесть при изгибе. Модернизированная установка позволяет на нижнем ярусе проводить испытания образцов балок на ползучесть при изгибе с загрузкой постоянной гравитационной нагрузкой (в качестве нагружающего устройства используются емкости с дробью) и испытания образцов балок на релаксацию бетона на верхнем ярусе с загрузкой их постоянной деформацией. Фотография фрагмента установки для проведения испытаний по определению релаксации приведена на рис. 4, схема испытания приведена на рис. 5.

Дополнительно были изготовлены установки по определению релаксации в режиме «изгиб» с помощью обратного нагружения. Суть метода в том, что образец в установке находится в перевернутом состоянии для минимизации деформаций ползучести и нагружение начальной деформацией происходит снизу вверх.

Испытания проводились в климатических камерах с поддержанием стабильной температуры и влажности в соответствии с ГОСТ 24544 [1].



Рис. 2. Общий вид установки с образцами-призмами при проведении испытаний для определения релаксации напряжений при сжатии

Fig. 2. General view of the test bench with prismatic samples during the compressive stress relaxation tests

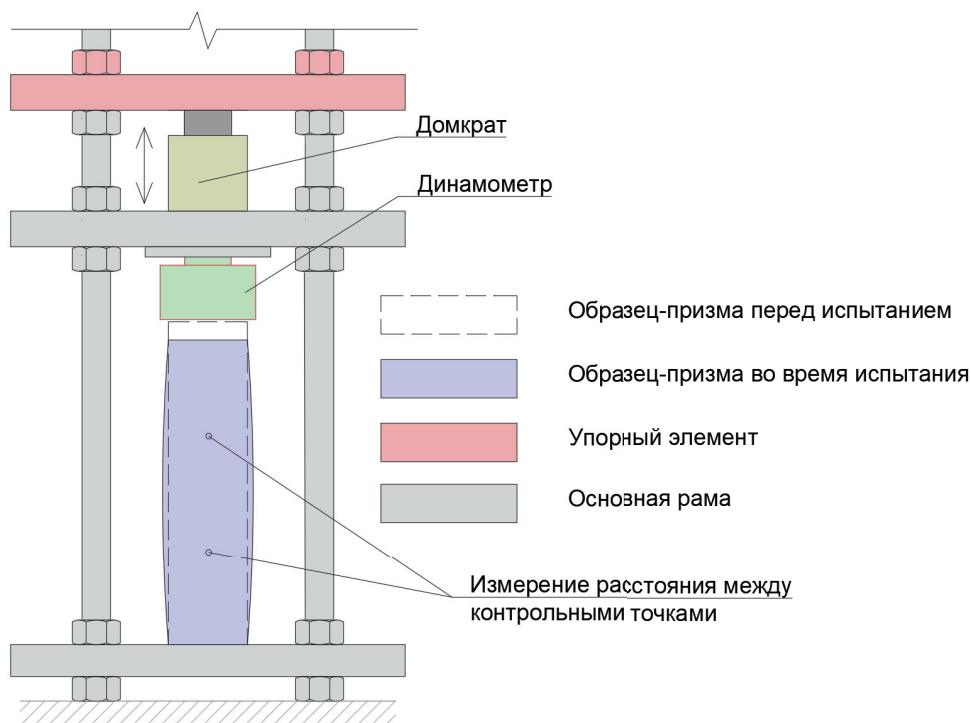


Рис. 3. Схема испытания для определения релаксации напряжений при сжатии
Fig. 3. Test scheme for the determination of compressive stress relaxation



Рис. 4. Установленный образец балки для проведения длительных испытаний по определению релаксации напряжений в бетоне при изгибе
Fig. 4. Installed beam sample for the long-term tests of concrete for bending stress relaxation

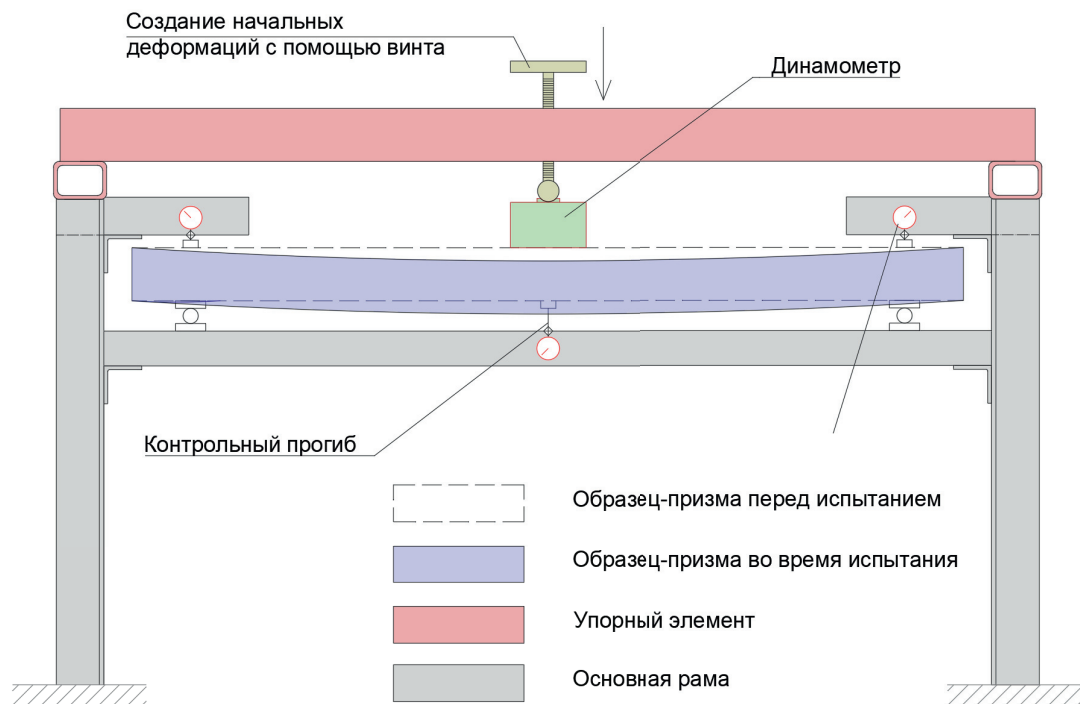


Рис. 5. Схема испытания для определения релаксации напряжений при изгибе
Fig. 5. Test scheme for the determination of bending stress relaxation

Бетонные образцы изготавливались двух классов по прочности на сжатие (В30 и В60), испытания проводились начиная с возраста 28 суток. Параллельно проводились испытания по определению релаксации напряжений в бетоне и на ползучесть при сжатии и изгибе для последующей математической обработки результатов.

Результаты исследования

Ниже в графическом виде приведены результаты эксперимента по определению указанных деформационных характеристик бетонных образцов (ползучесть и релаксация) как в режиме «сжатие», так и в режиме «изгиб» (рис. 6–7).

Выводы

Результатами эксперимента являются графики зависимости деформаций во времени (ползучесть бетонных образцов) при постоянной нагрузке, а также графики усилие–время (релаксация) при фиксированных деформациях. Полученные результаты при испытаниях на релаксацию в образцах-балках свидетельствуют об успешности примененной методики – происходит падение напряжений в балке при фиксированных деформациях.

Как видно из рис. 6, падение напряжений в образцах-призмах (релаксация напряжений в призмах) за 200 часов составило от 18 до 20%, при этом установленное измерительное

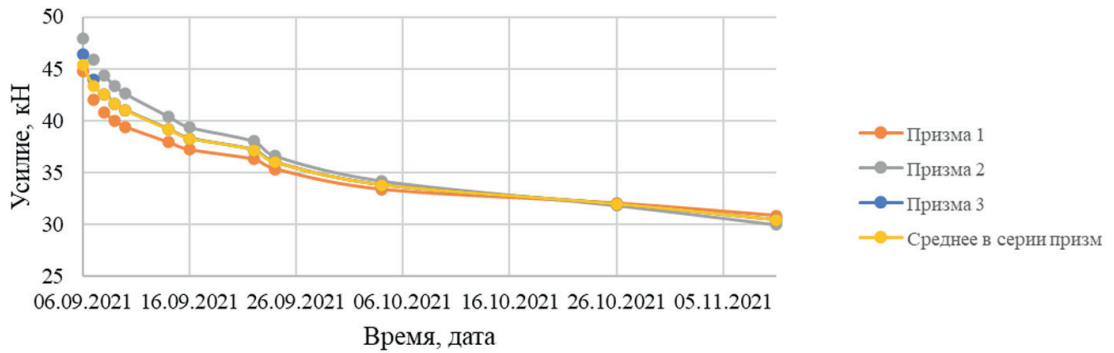


Рис. 6. Графики изменения напряжений в серии образцов призм по определению релаксации при сжатии (бетон В30)

Fig. 6. Plots of stress variations in a series of prismatic samples for the determination of compressive relaxation (В30 concrete)

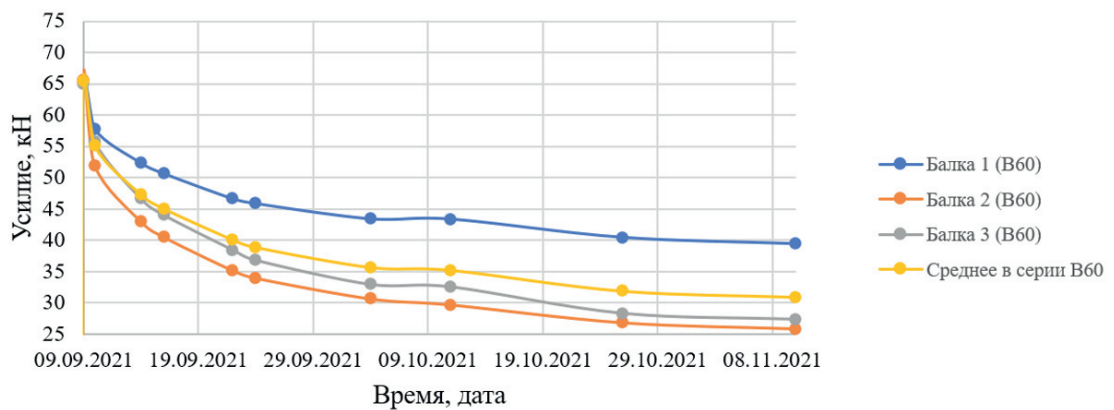
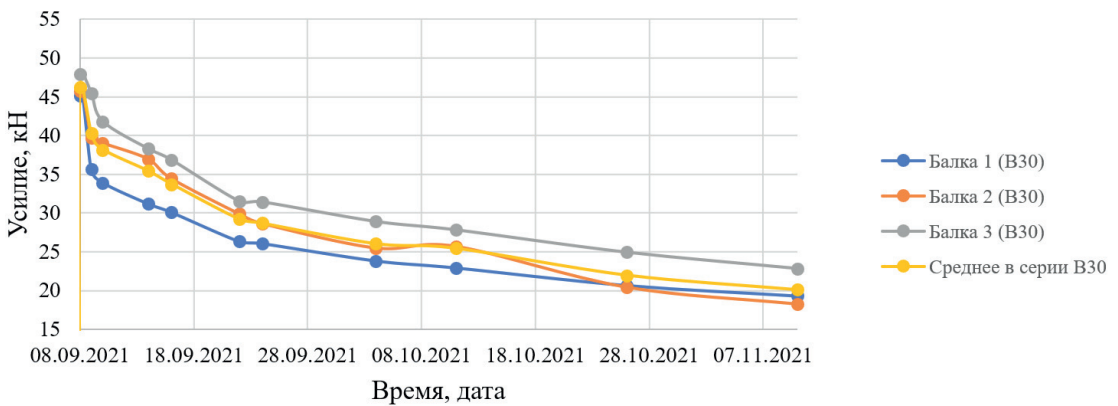


Рис. 7. Графики изменения усилий в серии образцов-балок по определению релаксации напряжений при изгибе (бетон В30 и В60)

Fig. 7. Plots of stress variations in a series of beam samples for the determination of bending stress relaxation (В30 and В60 concrete)

оборудование не зафиксировало деформации данных призм, что говорит об успешной реализации предлагаемой методики.

На рис. 7 представлены графики зависимости изменения усилия в образце во времени для образцов-балок из бетона класса В30. После нагружения произошло падение напряжений на 25–30 % от первоначальных. Для образцов-балок из бетона класса В60 после нагружения произошло падение напряжений на 22–38 % от первоначальных.

Помимо получения прямых результатов эксперимента в ходе его подготовки и проведения было выявлено, что при проведении испытаний балок предпочтительно использовать одну цилиндрическую катковую опору, а другую – шаровую (справедливо как для испытаний на ползучесть, так и на изгиб). Это уменьшит влияние неплоскостности нижней поверхности испытываемой балки. В случае двух цилиндрических катковых опор возможно неплотное примыкание балки к опоре и, как следствие, вертикальное перемещение центральной оси балки на опорах. При закручивании балки перемещения при изгибе могут быть с обратным знаком. Данный вывод одновременно распространяется и на испытания на ползучесть бетонных образцов при изгибе, и на релаксацию. Подготовлены предложения по внесению изменений в ГОСТ 24544.

Предложенная методика испытаний бетонных образцов на изгиб будет предназначена в первую очередь для специализированных лабораторий, проводящих стандартные длительные испытания, также она позволит удешевить сам процесс испытаний и наравне с внедренной в ГОСТ 24544-2020 методикой испытания на ползучесть бетонных балок расширит количество потребителей, испытательные установки возможно будет установить на крупных строительных площадках непосредственно для конкретного объекта (например, в атомной и энергетической отрасли).

Численный анализ экспериментальных исследований и аналитическое сравнение полученных результатов при испытаниях в разных режимах будут приведены в рамках отдельной статьи.

Список литературы

1. ГОСТ 24544-2020. Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести [интернет]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200177303> (дата доступа 20.09.2021).
2. ASTM C512. Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression. Publication Date: 31 Dec. 2010. <https://doi.org/10.1520/c0512-02>
3. European Committee for Standardization (CEN). EN 12390-17:2019. Testing hardened concrete – Part 17: Determination of creep of concrete in compression. Publication Date: 1 October 2019.
4. International Organization of Standards. ISO 1920-9 Testing of concrete — Part 9: Determination of creep of concrete cylinders in compression. Publication Date: 1 April 2009.
5. Загрядский И.И. Алгоритм численного определения деформаций бетона с учетом ползучести на основе его известных напряжений. Уточнение свойств мер релаксации и мер ползучести молодого бетона. Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2014;273:96–107.
6. Киорино М.А. Анализ конструктивных воздействий, зависящих от времени свойств бетона: международный согласованный формат (перевод с англ. яз.). Вестник НИЦ «Строительство». 2018;(1):48–66.
7. Гайджулов П.П., Исхакова Э.Р. Модели теории ползучести бетона и их конечноэлементная реализация. Вестник Донского государственного технического университета. 2012;12(7):99–107.
8. Загрядский И.И. Оценка точности приближенных аналитических зависимостей функции релаксации бетона от его функции ползучести. Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2014;272:59–69.
9. Крылов С.Б., Гончаров Е.Е. Решение задачи релаксации бетона в дифференциальной форме. Строительство и реконструкция. 2015;(3):26–31.

10. Гурьева Ю.А. Упрощенная теория нелинейной ползучести бетона при сжатии. Вестник гражданских инженеров. 2008;(2):37–41.
11. Charpin L., Sanahuja J. Creep and relaxation Poisson's ratio: Back to the foundations of linear viscoelasticity. Application to concrete. International Journal of Solids and Structures. 2017;110-111:2–14. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2017.02.009>
12. Shen D., Wena C., Kang J., Shi H., Xu Z. Early-age stress relaxation and cracking potential of High-strength concrete reinforced with Barchip fiber. Construction and Building Materials. 2020;258:119538. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119538>
13. Beushausen H., Alexander M.G. Failure mechanisms and tensile relaxation of bonded concrete overlays subjected to differential shrinkage. Cement and Concrete research. 2006;36(10):1908–1914. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.05.027>
14. Тамразян А.Г. Кустойчивости внецентренно сжатых железобетонных элементов с малым эксцентриситетом с учетом реологических свойств бетона. Железобетонные конструкции. 2023;2(2):48–57.

References

1. Stste Standard 24544-2020. Concrete. Methods for determining shrinkage and creep deformations [internet]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200177303> [accessed 20.09.2021] (in Russian).
2. ASTM C512. Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression. Publication Date: 31 Dec. 2010. <https://doi.org/10.1520/c0512-02>
3. European Committee for Standardization (CEN). EN 12390-17:2019. Testing hardened concrete – Part 17: Determination of creep of concrete in compression. Publication Date: 1 October 2019.
4. International Organization of Standards. ISO 1920-9 Testing of concrete — Part 9: Determination of creep of concrete cylinders in compression. Publication Date: 1 April 2009.
5. Zagryadsky I.I. Algorithm for numerical determination of concrete deformations taking into account creep based on its known stresses. Clarification of the properties of relaxation measures and creep measures of young concrete. Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva = Proceeding of the VNIIG. 2014;273:96–107 (in Russian).
6. Kiorino M.A. Analysis of structural impacts, time-dependent properties of concrete: an internationally agreed format [translated from English]. Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2018;(1):48–66 (in Russian).
7. Gaydzhuov P.P., Iskhakova E.R. Concrete creep theory models and their finite element implementation. Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Don State Technical University. 2012;12(7):99–107 (in Russian).
8. Zagryadsky I.I. Estimation of the accuracy of approximate analytical dependences of the relaxation function of concrete on its creep function. Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva = Proceeding of the VNIIG. 2014;272: 59–69 (in Russian).
9. Krylov S.B., Goncharov E.E. Solving the problem of concrete relaxation in differential form. Stroitel'stvo i rekonstruktsiya = Building and Reconstruction. 2015;(3):26–31 (in Russian).
10. Guryeva Yu.A. Simplified theory of nonlinear creep of concrete under compression. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov = Bulletin of Civil Engineers. 2008;(2):37–41 (in Russian).
11. Charpin L., Sanahuja J. Creep and relaxation Poisson's ratio: Back to the foundations of linear viscoelasticity. Application to concrete. International Journal of Solids and Structures. 2017;110-111:2–14. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2017.02.009>
12. Shen D., Wena C., Kang J., Shi H., Xu Z. Early-age stress relaxation and cracking potential of High-strength concrete reinforced with Barchip fiber. Construction and Building Materials. 2020;258:119538. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119538>
13. Beushausen H., Alexander M.G. Failure mechanisms and tensile relaxation of bonded concrete overlays subjected to differential shrinkage. Cement and Concrete research. 2006;36(10):1908–1914. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.05.027>
14. Tamrazyan A.G. On the Stability of Eccentrically Compressed Reinforced Concrete Elements with a Small Eccentricity, Taking into Account the Rheological Properties of Concrete. Reinforced Concrete Structures. 2023;2(2):48–57 (in Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Петр Дмитриевич Арленинов[✉], канд. техн. наук, заместитель заведующего лабораторией механики железобетона НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций НИУ МГСУ, Москва
e-mail: arleninoff@gmail.com
тел.: +7 (499) 174-74-07

Petr D. Arlenin[✉], Cand. Sci. (Engineering), Deputy Head, Laboratory of Reinforced Concrete Mechanics, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Associate Professor, Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow
e-mail: arleninoff@gmail.com
tel.: +7 (499) 174-74-07

Сергей Борисович Крылов, д-р техн. наук, заведующий лабораторией механики железобетона НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», член-корреспондент РААСН, Москва
e-mail: niizhb_lab8@mail.ru
тел: +7 (965) 322-21-47

Sergei B. Krylov, Dr. Sci. (Engineering), Laboratory Head, Laboratory of Reinforced Concrete Mechanics, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Corresponding Member of RAACS, Moscow
e-mail: niizhb_lab8@mail.ru
tel: +7 (965) 322-21-47

Полина Сергеевна Калмакова, инженер лаборатории механики железобетона НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: polina15kalmakowa@gmail.com
тел: +7 (916) 239-38-95

Polina S. Kalmakova, Engineer, Laboratory of Reinforced Concrete Mechanics, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: polina15kalmakowa@gmail.com
tel: +7 (916) 239-38-95

Алексей Валентинович Донов, заведующий лабораторией экспертизы, строительного контроля, сопровождения бетонных и ремонтных работ ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, Санкт-Петербург
e-mail: donovav@vniig.ru
тел: +7 (921) 633-79-83

Aleksei V. Donov, Laboratory Head, Laboratory of Expertise, Construction Control and Support of Concrete and Repair Works, All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering (VNIIG) named after B.E. Vedeneev, St. Petersburg
e-mail: donovav@vniig.ru
tel: +7 (921) 633-79-83

[✉] Автор, ответственный за переписку / Corresponding author