

# Строительные материалы и изделия

## Building materials and products

Научная статья

УДК 624.012

DOI: 10.14529/build230402

### ВЛИЯНИЕ УРОВНЯ НАГРУЖЕНИЯ НА КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЗУЧЕСТИ БЕТОНА

**А.Д. Истомин**, *nauka.@mail.ru*

**А.Э. Веретенникова**, *anneta\_veretennikova@mail.ru*

*Национальный исследовательский Московский государственный  
строительный университет, Москва, Россия*

**Аннотация.** Железобетонные конструкции, которые подвергаются длительной нагрузке, со временем деформируются. Это связано с ползучестью бетона. При напряжениях (45...50) % от призмочной прочности бетона при длительном нагружении проявляется нелинейная ползучесть. Это приводит к тому, что при расчете железобетонных конструкций необходимо учитывать влияние уровня напряжений в сжатом бетоне на коэффициент ползучести, с помощью которого определяется модуль деформаций бетона в условиях длительного нагружения. Целью данной работы являлось экспериментальное исследование влияния уровня нагружения на коэффициент ползучести водонасыщенного бетона. В связи с этим были проведены экспериментальные исследования ползучести тяжелого модифицированного бетона. В качестве опытных образцов были приняты бетонные призмы размером 10 × 10 × 40 см. В экспериментах варьировался уровень нагружения бетонных призм от 0,35 до 0,9. В результате проведенных исследований установлено, что при уровнях нагружения 0,8...0,9 коэффициент ползучести практически не изменяется. На основании опытных данных, анализа данных различных авторов, отечественных и европейских норм предложены зависимости, отражающие влияние уровня нагружения, класса бетона по прочности на сжатие и относительной влажности окружающей среды на предельное значение коэффициента ползучести сжатого бетона.

**Ключевые слова:** бетон, ползучесть, мера ползучести, коэффициент ползучести, уровень нагружения, модуль упругости, предельные значения

**Для цитирования.** Истомин А.Д., Веретенникова А.Э. Влияние уровня нагружения на коэффициент ползучести бетона // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2023. Т. 23, № 4. С. 19–26. DOI: 10.14529/build230402

Original article

DOI: 10.14529/build230402

### THE INFLUENCE OF THE LEVEL OF LOAD ON THE COEFFICIENT OF THE CREEP OF CONCRETE

**A.D. Istomin**, *nauka.@mail.ru*

**A.E. Veretennikova**, *anneta\_veretennikova@mail.ru*

*National Research Moscow State University of Civil Engineering (MGSU), Moscow, Russia*

**Abstract.** Reinforced concrete structures subjected to long-term load subsequently deform over time. This is due to the creep of concrete. Nonlinear creep appears at stresses (45...50)% of the prismatic strength of concrete under long-term loading. This leads to the fact that when calculating reinforced concrete structures, it is necessary to take into account the effect of the stress level in the compressed concrete on the creep coefficient, which is used to determine the concrete deformation modulus under conditions of long-term loading. The aim of this paper was an experimental study of the effect of the loading level on the creep coefficient of water-saturated concrete. In this regard, the experimental studies of the creep of heavy modified concrete were carried out. Concrete prisms 10×10×40 cm in size were taken as prototypes. The loading level of concrete prisms varied from 0.35 to 0.9 in the experiments. The results of the research proved that at loading levels of 0.8 ... 0.9, the creep coefficient practically does not change. Based on experimental data and the analysis of data from various authors, domestic and European standards, the paper proposed the dependencies

© Истомин А.Д., Веретенникова А.Э., 2023.

that reflect the influence of the loading level, concrete compressive strength class and relative humidity of the environment on the limiting value of the creep coefficient of compressed concrete.

**Keywords:** concrete, creep, measure of creep, creep coefficient, loading level, modulus of elasticity, limit

**For citation.** Istomin A.D., Veretennikova A.E. The influence of the level of load on the coefficient of the creep of concrete. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture.* 2023;23(4):19–26. (in Russ.). DOI: 10.14529/build230402

### Введение

Многочисленные экспериментальные исследования подтверждают, что теория упруго-ползучего тела наиболее полно описывает процесс деформирования бетона. Однако линейная теория применима при относительно невысоких сжимающих напряжениях: при  $\sigma_b \leq 0,5R_b$  [РФ],  $\sigma_b \leq 0,45R_b$  [1–6]. При более высоких напряжениях справедлива нелинейная теория ползучести. Современная нелинейная теория ползучести основана на следующей зависимости [7]:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(\tau_1)}{E(\tau_1)} + F[\sigma_b(\tau_1)]C(t, \tau_1), \quad (1)$$

где  $\varepsilon(t)$  – деформация ползучести;  $\sigma(\tau_1)$  – приложенное постоянное напряжение сжатия;  $E(\tau_1)$  – модуль упруго-мгновенных деформаций бетона;  $C(t, \tau_1)$  – мера ползучести в момент времени  $t$ ;  $F[\sigma_b(\tau_1)]$  – функция, характеризующая нелинейность деформаций ползучести, которая в общем виде имеет вид:

$$F[\sigma_b(\tau_1)] = \begin{cases} \sigma_b & \text{при } \sigma_b \leq \eta_b R_b; \\ f(\sigma_b) & \text{при } \sigma_b > \eta_b R_b, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\eta_b$  – уровень нагружения, при котором линейная ползучесть условно переходит в нелинейную.

Зависимость между переменными во времени напряжениями и деформациями в условиях нелинейной ползучести записывается в виде [7]:

$$\varepsilon_b(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t)} - \int_{\tau_1}^t \sigma_b(\tau) \frac{\partial(1/E(\tau))}{\partial \tau} d\tau - \int_{\tau_1}^t f[\sigma_b(\tau)] \frac{\partial C(t, \tau)}{\partial \tau} d\tau. \quad (3)$$

Зависимость (3) представляет собой основное уравнение теории нелинейной ползучести бетона, когда одновременно учитывается старение и наследственность.

В уравнениях нелинейной теории ползучести функция  $f(\sigma_b)$  нелинейно связана с напряжением в бетоне  $\sigma_b$ . Для выражения  $f(\sigma_b)$  в теории ползучести обычно принимают степенную зависимость [7], некоторые предложения по которой приведены в табл. 1.

И.И. Улицкий [10], принимая значение функции напряжений по предложенной Н.Х. Арутюняном [7] зависимости, дал рекомендации по определению параметра нелинейности  $\beta$ . На основании анализа и обобщения многих экспериментальных результатов выявлены величины  $\beta$  в зависимости от относительного уровня напряжений и кубиковой прочности бетона. При этом оказалось, что  $\beta$  изменяется в пределах от 0,002 до 0,005.

В.М. Бондаренко [11] на основе выполненных исследований для случая монотонного нагружения рекомендует следующее уравнение деформации бетона:

$$\varepsilon_b(t) = \frac{S_M \left[ \frac{\sigma(t)}{R(t)} \right]}{E_M^0(t)} - \int_{\tau_0}^t S_n \left[ \frac{\sigma(\tau)}{R(\tau)} \right] \frac{\partial \delta(t, \tau)}{\partial \tau} d\tau. \quad (4)$$

В формуле (4)  $E_M^0(t)$  – начальный модуль упруго-мгновенной деформации, соответствующий нулевому напряжению;  $S_M$  и  $S_n$  – функции нелинейности соответствующих частей деформаций, принимаемых, в частности, в виде:

$$S_n \left[ \frac{\sigma(\tau)}{R(\tau)} \right] = \sigma(\tau) S_0 \left[ \frac{\sigma(\tau)}{R(\tau)} \right], \quad (5)$$

$$S_n \left[ \frac{\sigma(\tau)}{R(\tau)} \right] = \sigma(\tau) S_0 \left[ \frac{\sigma(\tau)}{R(\tau)} \right] = 1 + \eta \left[ \frac{\sigma(\tau)}{R(\tau)} \right]^m, \quad (6)$$

где  $\eta$  и  $m$  – параметры нелинейности деформирования.

О.Я. Берг и А.И. Рожков [12] на основании результатов экспериментальных исследований

Таблица 1

Запись функции, характеризующей нелинейность деформаций ползучести

Автор	П.И. Васильев [8]	Н.Х. Арутюнян [7]	Р. А. Мельник [9],
Зависимость	$f(\sigma_b) = k\sigma_b + A\sigma_b^n$	$f(\sigma_b) = \sigma_b + \beta\sigma_b^2$	$f(\sigma_b) = a\sigma_b^n$

Примечание. В формулах табл. 1 коэффициенты  $k, A, \beta, a$  – опытные параметры, характеризующие степень нелинейности функции  $f(\sigma_b)$ .

предложили определять деформации нелинейной ползучести в диапазоне относительных напряжений  $\eta_{crc}^0 \leq \eta_b < \eta_{lon}$  по формулам:

$$\varepsilon(\eta_0, \eta_{crc}^0, t-\tau) = \begin{cases} \sigma_b C(t-\tau) [1 + \Phi(\eta_0, \eta_{crc}^0, t-\tau)] K(\eta_0, \eta_{crc}^0, T) & \text{при } t-\tau < T(\eta_0, \eta_{crc}^0); \\ \sigma_b C(t-\tau) + C(\eta_0, \eta_{crc}^0, T) K(\eta_0, \eta_{crc}^0, T) & \text{при } t-\tau \geq T(\eta_0, \eta_{crc}^0), \end{cases} \quad (7)$$

где  $\eta_0$  – начальный относительный уровень напряжений;

$\eta_{crc}^0$  – относительный уровень нижней границы микротрещинообразования;

$\eta_{lon}$  – предел длительной прочности бетона.

Уровни напряжений, соответствующих нижней и верхней границам микротрещинообразования, рекомендуется определять по предложениям [13, 14].

В выражении (7) верхнее выражение описывает развитие суммарных деформаций ползучести и пластических деформаций второго рода до момента перехода  $T(\eta_0, \eta_{crc}^0)$ , нижнее выражение описывает деформации ползучести после прекращения развития пластических деформаций второго рода, т. е. после  $t-\tau \leq T(\eta_0, \eta_{crc}^0)$  функция  $\Phi(\eta_0, \eta_{crc}^0, t-\tau)$ , отражающая затухание процесса развития микроразрушений на отрезке времени  $T(\eta_0, \eta_{crc}^0)$ , монотонно убывает до момента  $t-\tau = T(\eta_0, \eta_{crc}^0)$ . Функция  $K(\eta_0, \eta_{crc}^0, T)$  связана с величиной деформаций нелинейной ползучести в момент  $T(\eta_0, \eta_{crc}^0)$ . Функцию линейной ползучести  $C(t-\tau)$  авторы рекомендуют принимать в виде, предложенном С.В. Александровским [15].

В данной работе функция напряжений была принята в виде:

$$f(\sigma_b) = k \cdot \Delta\eta_b + A \cdot \Delta\eta_b^n, \quad (8)$$

где  $\Delta\eta_b = \eta_b - 0,45$ ;

$\eta_b = \sigma_b / R_b$  – относительный уровень нагружения,

причем

$$\varepsilon_{pl}(t) = F[\sigma_b(\tau_1)] C(t, \tau_1) \quad (9)$$

или

$$\varepsilon_{pl}(t) = [\beta_0 \sigma_b(\tau_1) + \beta \sigma_b^2(\tau_1)] C(t, \tau_1). \quad (10)$$

При линейной зависимости между напряжениями и деформациями ползучести

$$\varepsilon_{pl}(t) = \sigma_b(\tau_1) C(t, \tau_1), \quad (11)$$

$$C(t, \tau_1) = \frac{\varepsilon_{pl}(t)}{\sigma_b(\tau_1)}. \quad (12)$$

Таким образом,  $f(\sigma_b(\tau_1))$  принималась в виде

$$f(\sigma_b(\tau_1)) = 0,625\sigma_b(\tau_1) + 0,0065\sigma_b^2(\tau_1) \quad (13)$$

и, соответственно:

$$\varepsilon_{pl}(t) = [0,625\sigma_b(\tau_1) + 0,0065\sigma_b^2(\tau_1)] C(t, \tau_1), \quad (14)$$

где  $C(t, \tau_1)$  принималось в виде

$$C(t, \tau) = \varphi(\tau) - \psi(t) \left[ \frac{e^{\gamma\tau} - A_2}{e^{\gamma t} - A_2} \right] - \Delta(\tau) e^{-\alpha(t-\tau)},$$

$$\psi(t) = C_\infty(\tau) - \Delta(\tau).$$

В практике проектирования железобетонных конструкций используется коэффициент ползучести бетона:

$$\varphi_{cr}(t, \tau_1) = \frac{\varepsilon_{pl}(t)}{\varepsilon_{el}(\tau_1)} = E_b C(t, \tau_1), \quad (15)$$

где  $\varepsilon_{pl}(t)$ ,  $\varepsilon_{el}(\tau_1)$  – соответственно деформации ползучести и упругие деформации;  $\sigma(\tau_1)$  – приложенное постоянное напряжение сжатия;  $E(\tau_1)$  – модуль упруго-мгновенных деформаций бетона;  $C(t, \tau_1)$  – мера ползучести в момент времени  $t$ .

Деформации ползучести связаны с коэффициентом ползучести зависимостью:

$$\varepsilon_{pl}(t) = \sigma_b(\tau_1) \cdot C(t, \tau_1) = \frac{\sigma_b(\tau_1)}{E_b} \varphi_{cr}(t, \tau_1). \quad (16)$$

Предельные значения коэффициента ползучести для бетона согласно [15] записываются в виде

$$\varphi(\infty, t_0) = \begin{cases} \varphi_{0b,cr} & \text{при } \sigma_b \leq 0,45R_b; \\ \varphi_{0b,cr} f(\sigma_b) & \text{при } \sigma_b > 0,45R_b. \end{cases} \quad (17)$$

Существенную роль при развитии деформаций ползучести имеет влажность бетона, а именно миграция влаги внутри бетона [16–18]. До настоящего времени мало изученным является вопрос влияния уровня нагружения на деформации ползучести бетона различной влажности в условиях ЦЗО. В связи с этим были проведены комплексные исследования ползучести бетона и в частности коэффициента ползучести в нормальных условиях и при циклическом замораживании и оттаивании. В данной работе приводятся результаты исследований коэффициента ползучести сжатого водонасыщенного бетона в нормальных условиях в зависимости от уровня напряжений.

### 1. Материалы и методы

В качестве опытных образцов использовались бетонные призмы с размерами 10 × 10 × 40 см. Для изготовления опытных образцов использовался тяжелый модифицированный бетон.

Состав бетона по весу (Ц/Ц:В/Ц:П/Ц:Щ/Ц) 1:0,32:1,2:2,2. Расход цемента при этом принят 500 кг на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси. В состав бетонной смеси вводились газовыделяющая добавка ГКЖ-94 в количестве 0,15 % и суперпластификатор С-3 в количестве 0,7 % от массы цемента.

Для приготовления бетона использовался гранитный щебень фракции 5–15 мм, речной песок с модулем крупности  $M_{кр} = 2,1$ , портландцемент марки 400. Образцы изготавливались в металлической опалубке. В течение 28 суток образцы хранились во влажной среде при температуре +(20±5) °С и относительной влажности 80... 95 %.

В возрасте 120 суток бетонные призмы водонасыщались. Призмы укладывались в горизонтальном положении в ванну и заливались водой в течение тридцати суток: уровень воды поднимался на 2 см через каждые 5 суток.

Влажность бетона (W) определялась испытанием проб, полученных дроблением образцов после их испытания на кратковременное сжатие.

Для длительных испытаний бетона при сжатии в нормальных условиях использовалась установка, схема которой представлена на рис. 1.

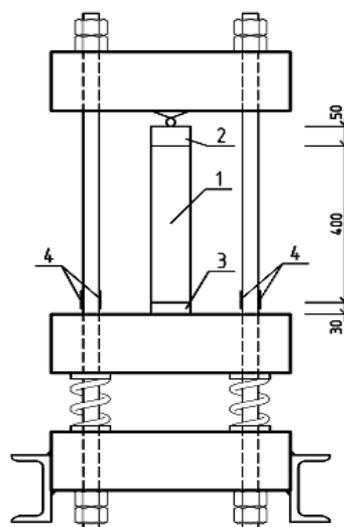


Рис. 1. Силовая установка для испытания призмы при длительной нагрузке: 1 – бетонная призма; 2 – металлическая пластина  $\delta = 50$  мм; 3 – металлическая пластина  $\delta = 30$  мм; 4 – тензодатчики

Перед нагружением длительной нагрузкой бетонных образцов-призм производилась тарировка силовой установки.

Ползучесть бетона при сжатии определялась на призмах, загружаемых в возрасте  $\tau_1 = 120$  суток постоянной длительно действующей нагрузкой. Деформации измерялись с помощью тензометрических датчиков и с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 0,001 мм. В ходе эксперимента варьировался уровень нагружения от (0,35–0,9) $R_b$ . Общая продолжительность длительного испытания бетонных призм составила 320 суток.

Во время экспериментов фиксировалась деформации набухания в процессе циклического замораживания – оттаивания.

### 2. Результаты и обсуждение

Деформативные и прочностные свойства бетона определились на бетонных кубах с ребром 10 см и образцах-призмах с размерами 10 × 10 × 40 см. Результаты, полученные как средние по трем образцам, приведены в табл. 2.

Влажность водонасыщенного бетона перед замораживанием – оттаиванием составила  $W = 5,05$  %.

Таблица 2  
Деформативные и прочностные характеристики бетона в возрасте  $\tau_1$

$\tau_1$ , сут	$R_b$ , МПа	$E_b \cdot 10^{-3}$ , МПа	$R_{crc}^0$ , МПа	$\frac{R_{crc}^0}{R_b}$	$R_{crc}^v$ , МПа	$\frac{R_{crc}^v}{R_b}$	$\varepsilon_{b0} \cdot 10^5$
28	35,10	31,9	15,05	0,43	28,52	0,81	190
120	45,4	33,41	19,52	0,43	37,23	0,82	185

На рис. 2 представлены деформации ползучести бетона при различных уровнях нагружения (0,35...0,9) $R_b$ .

Из анализа графика можно заметить, что с повышением уровня нагружения наблюдается более интенсивное развитие деформаций ползучести.

На рис. 3, 4 представлены графики изменения меры и коэффициента ползучести в зависимости от уровня нагружения.

Из анализа графиков можно заключить, что с повышением уровня нагружения наблюдается рост меры и коэффициента ползучести. Причем при уровнях напряжений (0,8 и 0,9)  $R_b$  значения меры и коэффициента ползучести практически одинаковы.

При проектировании железобетонных конструкций представляют интерес предельные значения параметров ползучести, в частности, предельные значения коэффициента ползучести. В результате обработки полученных результатов исследований, приведенных на рис. 4, получены на основании формулы (17) следующие зависимости для предельных значений коэффициента ползучести в зависимости от уровня нагружения бетона:

$$\varphi(\infty, t_0) = \begin{cases} \varphi_{0b,cr} & \text{при } \sigma_b \leq 0,45R_b; \\ \varphi_{0b,cr} f(\sigma_b) & \text{при } \sigma_b > 0,45R_b, \end{cases} \quad (18)$$

где  $f(\Delta\eta_b)$  – функция нелинейности ползучести бетона:

$$f(\Delta\eta_b) = \exp k(\eta_b - 0,45). \quad (19)$$

Тогда предельные значения коэффициента ползучести при  $\sigma_b > 0,45R_b$  можно записать в виде

$$\begin{aligned} \varphi_{b,cr} &= \varphi_{0b,cr} \cdot \exp k(\eta_b - 0,45) = \\ &= \varphi_{0b,cr} \cdot \exp k(\Delta\eta_b), \end{aligned} \quad (20)$$

где  $\Delta\eta_b = \eta_b - 0,45$ ,

$$k = 2,224(\eta_\sigma - 0,45) - 1,742(\eta_\sigma - 0,45)^2; \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{b,cr} &= \varphi_{b0,cr} \exp\left(2,224(\eta_\sigma - 0,45)^2 - \right. \\ &\left. - 1,742(\eta_\sigma - 0,45)^3\right), \end{aligned} \quad (22)$$

или

$$\varphi_{b,cr} = \varphi_{b0,cr} \exp\left(2,224(\Delta\eta_\sigma)^2 - 1,742(\eta_{\sigma\Delta})^3\right), \quad (23)$$

где  $\varphi_{0b,cr} = \varphi(\infty, \tau_0)$  – предельное нормативное значение коэффициента линейной ползучести, то есть при  $\sigma_b \leq 0,45R_b$ .

Предельные значения коэффициента ползучести бетона для уровня нагружения  $\sigma_b \leq 0,45R_b$  на основании данных СП 63.13330.2018 могут быть представлены в виде

$$\varphi_{0b,cr} = \varphi(\infty, \tau_0) = a \ln B + b, \quad (24)$$

где  $a$  и  $b$  – эмпирические коэффициенты, определяемые по формулам:

$$a = -0,000232\varphi^2 + 0,054725\varphi - 3,784135, \quad (25)$$

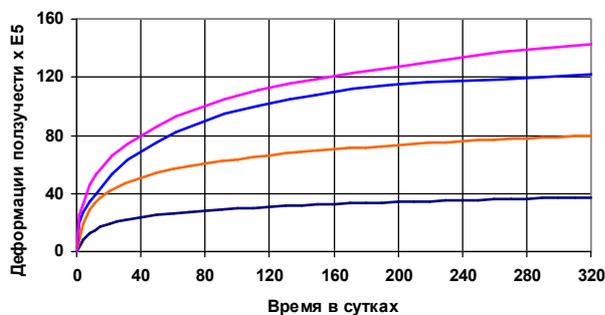


Рис. 2. Деформации ползучести бетона при различных уровнях нагружения

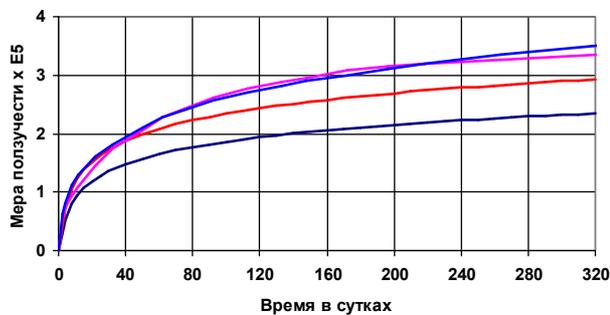


Рис. 3. Мера ползучести бетона при различных уровнях нагружения

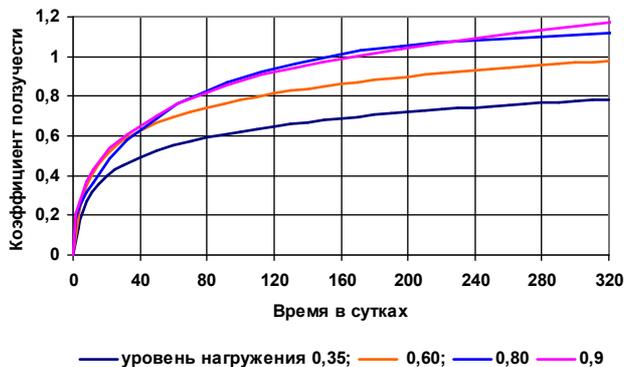


Рис. 4. Коэффициент ползучести бетона при различных уровнях нагружения

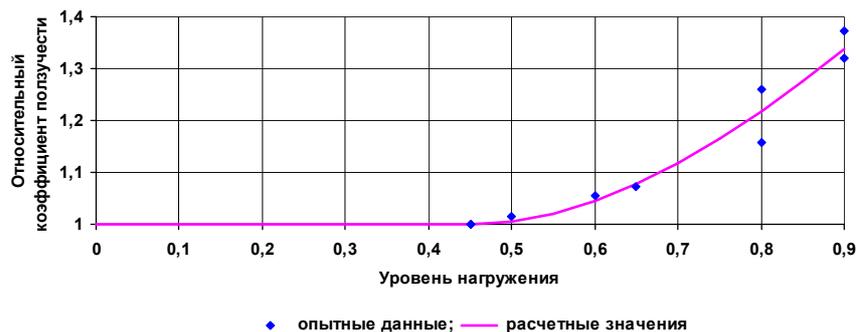


Рис. 5. Зависимость относительного предельного коэффициента ползучести ( $k = \varphi_{b,cr} / \varphi_{0b,cr}$ ) бетона от уровня нагружения

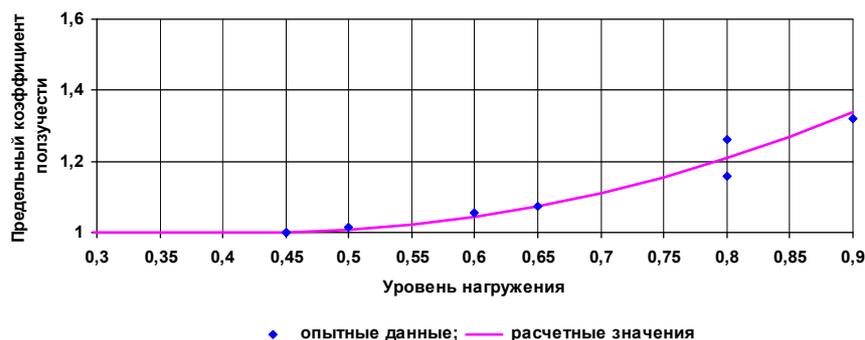


Рис. 6. Зависимость предельного коэффициента ползучести бетона от уровня нагружения

$$b = 0,001374\varphi^2 - 0,301207\varphi + 19,877596, \quad (26)$$

$\varphi$  – влажность воздуха, %,

$B$  – класс бетона по прочности на сжатие.

При водонасыщении бетона влажность принимается 100 %.

Результаты расчета значений предельного коэффициента ползучести и относительного коэффициента ползучести по формуле (24) представлены на рис. 5, 6.

Из представленных результатов видно, что наблюдается удовлетворительная сходимость результатов расчета и опытных значений. Предельное значение коэффициента линейной ползучести испытанного бетона оказалось равным  $\varphi_{0b,cr} = 1,0$ .

В некоторых отечественных нормах, в отличие от СП 63.13330.2018, приводятся значения

деформаций ползучести или мер ползучести. Предельные нормативные значения коэффициентов линейной ползучести могут быть определены из выражения

$$\varphi_{cr}(t, \tau_1) = \frac{\varepsilon_{pl}(t)}{\varepsilon_{el}(\tau_1)} = E_b C(t, \tau_1). \quad (27)$$

### Заключение

На основании проведенных экспериментальных исследований влияния уровня нагружения сжатого бетона на его ползучесть предложены зависимости, отражающие влияние уровня нагружения, класса бетона по прочности на сжатие и относительной влажности окружающей среды на предельное значение коэффициента ползучести сжатого бетона.

### Список литературы

1. Алмазов В.О. Проектирование железобетонных конструкций по ЕВРОНОРМАМ. Научное издание. М.: Из-во АСВ. Строительство и архитектура. 2011. 216 с.
2. Щербаков Е.Н., Ажиудинов С.С. Экспериментальное обоснование зависимости ползучести цементных бетонов от уровня сжимающих напряжений // Бетон и железобетон. 1994. № 3. С. 18–21.
3. Берг О.Я., Щербаков Е.Н. К учету нелинейной связи напряжений и деформаций ползучести бетона в инженерных расчетах // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1973. № 12. С. 14–21.
4. Тамразян А.Г., Есян С.Г. Механика ползучести бетона: монография. М.: МГСУ, 2012. 524 с.
5. Paulson K.A., Nilson A.H., Hover K.C. Long term deflection of high-strength concrete beams // ACI Materials Journal. 1991. Vol. 88, No. 2. P. 197–206.
6. Галустов К.З. Нелинейная теория ползучести бетона и расчет железобетонных конструкций. М.: Физматлит, 2006.
7. Арутюнян Н.Х. Некоторые вопросы теории ползучести. М.; Л.: Гостехиздат, 1952. 323 с.

8. Васильев П.И. Нелинейные деформации ползучести бетона // Изв. ВНИИГ. 1971. Т. 95. С. 59–69.
9. Мельник Р.А. Применение функции напряжений для определения деформаций нелинейной ползучести бетона. Строительные конструкции. Том IV. Киев, 1966.
10. Улицкий И.И. Определение величин деформаций и усадки бетонов. Киев: Госстройиздат УССР, 1963.
11. Бондаренко В.М. Некоторые вопросы нелинейной теории железобетона. Харьков, 1968. 324 с.
12. Берг О.Я., Рожков А.И. К расчету нелинейной ползучести бетона // Бетон и железобетон. 1967. № 9. С. 29–32.
13. Берг О.Я., Щербаков Е.Н., Писанко Г.Н. Высокопрочный бетон. М.: Стройиздат, 1971. 207 с.
14. Истомин А.Д., Беликов Н.А. Зависимость границ микротрещинообразования бетона от его прочности и вида напряжённого состояния // Вестник МГСУ. 2011. № 2–1. С. 159–162.
15. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменение температуры и влажности с учетом ползучести. М.: Стройиздат, 1973. 432 с.
16. Забегаев А.В., Тамразян А.Г. О влиянии внутренней влаги на деформативность бетона // Бетон и железобетон. 1997. № 1. С. 21–24.
17. Тамразян А.Г. Реологическая модель деформирования бетона // Бетон и железобетон. 1998. № 1. С. 20–22.
18. Тамразян А.Г. О механизме деформирования бетона, связанном с миграцией внутренней влаги в порах и капиллярах цементного камня // Известия высших учебных заведений. Строительство. 1998. № 4–5. С. 51–55.

#### References

1. Almazov V.O. *Proektirovanie zhelezobetonnykh konstruksiy po EVRONORMAM. Nauchnoe izdanie* [Design of reinforced concrete structures according to EURONORMS. Scientific publication]. Moscow: ASV Publ. Construction and architecture, 2011. 216 p. (in Russ.)
2. Shcherbakov E.N., Azhidinov S.S. [Experimental substantiation of the dependence of cement concrete creep on the level of compressive stresses]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 1994;3:18–21. (in Russ.)
3. Berg O.Ya., Shcherbakov E.N. [To account for the nonlinear relationship of stresses and deformations of concrete creep in engineering calculations]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura*. [News from higher educational institutions. Construction and architecture]. 1973;12:14–21. (in Russ.)
4. Tamrazyan A.G., Esayan S.G. *Mekhanika polzuchesti betona: monografiya*. [Creep Mechanics of Concrete: monograph]. Moscow: MGSU, 2012. 524 p. (in Russ.)
5. Paulson K.A., Nilson A.H., Hover K.C. Long term deflection of high-strength concrete beams. *ACI Materials Journal*. 1991;88(2):197–206.
6. Galustov K.Z. *Nelineynaya teoriya polzuchesti betona i raschet zhelezobetonnykh konstruksiy* [Nonlinear theory of concrete creep and calculation of reinforced concrete structures]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2006. (in Russ.)
7. Arutyunyan N.Kh. *Nekotorye voprosy teorii polzuchesti* [Some questions of the theory of creep]. Moscow, Leningrad: Gostekhizdat Publ.; 1952. 323 p. (in Russ.)
8. Vasil'ev P.I. [Nonlinear creep deformations of concrete]. *Proceedings of the VNIIG*. 1971;95:59–69. (in Russ.)
9. Mel'nik R.A. *Primenenie funktsii napryazheniy dlya opredeleniya deformatsiy nelineynoy polzuchesti betona. Stroitel'nye konstruksii* [Application of the stress function to determine the deformations of non-linear creep of concrete. Building construction]. Volume IV. Kiev, 1966. (in Russ.)
10. Ulitskiy I.I. *Opredelenie velichin deformatsiy i usadki betonov* [Determination of the values of deformations and shrinkage of concrete]. Kiev: Gosstroyizdat of the USSR, 1963. (in Russ.)
11. Bondarenko V.M. *Nekotorye voprosy nelineynoy teorii zhelezobetona* [Some questions of the nonlinear theory of reinforced concrete]. Khar'kov; 1968. 324 p. (in Russ.)
12. Berg O.Ya., Rozhkov A.I. [To the calculation of the nonlinear creep of concrete] *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 1967;9:29–32 (in Russ.)
13. Berg O.Ya., Shcherbakov E.N., Pisanko G.N. *Vysokoprochnyy beton* [High strength concrete]. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1971. 207 p. (in Russ.)
14. Istomin A.D., Belikov N.A. Dependence of the borders of the microcreeping in concrete from strengs and strain condition. *Vestnik MGSU*. 2011;2–1:159–162. (in Russ.)
15. Aleksandrovskiy S.V. *Raschet betonnykh i zhelezobetonnykh konstruksiy na izmenenie temperatury i vlazhnosti s uchetom polzuchesti* [Calculation of concrete and reinforced concrete structures for changes in temperature and humidity, taking into account creep]. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1973. 432 p. (in Russ.)

16. Zabegaev A.V., Tamrazyan A.G. [On the effect of internal moisture on the deformability of concrete]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 1997;1:21–24. (in Russ.)

17. Tamrazyan A.G. [Rheological model of concrete deformation]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 1998;1:20–22. (in Russ.)

18. Tamrazyan A.G. [On the mechanism of concrete deformation associated with the migration of internal moisture in the pores and capillaries of the cement stone]. *News of higher educational institutions. Construction*. 1998;4–5:51–55. (in Russ.)

***Информация об авторах:***

**Истомин Андрей Дмитриевич**, кандидат технических наук, преподаватель кафедры железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия; nauka.@mail.ru

**Веретенникова Анна Эдуардовна**, студент магистратуры кафедры железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия; anneta\_veretennikova@mail.ru

***Information about the authors:***

**Andrey D. Istomin**, Candidate of technical sciences, Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia; nauka.@mail.ru

**Anna E. Veretennikova**, Master's student of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia; anneta\_veretennikova@mail.ru

***Статья поступила в редакцию 09.08.2023; принята к публикации 15.08.2023.***

***The article was submitted 09.08.2023; approved after reviewing 15.08.2023.***