

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2023, Том 15, № 5 / 2023, Vol. 15, Iss. 5 <https://esj.today/issue-5-2023.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/36SAVN523.pdf>

2.1.9. Строительная механика (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Гатиев, М. Ш. Учет старения бетона при расчете железобетонных плит на ползучесть / М. Ш. Гатиев, Н. А. Аюбов, С. В. Клюев, С. В. Литвинов // Вестник евразийской науки. — 2023. — Т. 15. — № 5. — URL: <https://esj.today/PDF/36SAVN523.pdf>

For citation:

Gatiev M.Sh., Ayubov N.A., Klyuev S.V., Litvinov S.V. Taking into account concrete aging when calculating reinforced concrete slabs for creep. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023; 15(5): 36SAVN523. Available at: <https://esj.today/PDF/36SAVN523.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.)

УДК 624.04

Гатиев Магомед Шамильевич

ФГБУН «Комплексный научно-исследовательский институт имени Х.И. Ибрагимова Российской академии наук»,
Грозный, Россия
Младший научный сотрудник
ФГБОУ ВО «Ингушский государственный университет», Магас, Россия
Старший преподаватель
E-mail: guvho@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0948-4497>
РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=717490

Аюбов Нарман Аюбович

ФГБУН «Комплексный научно-исследовательский институт имени Х.И. Ибрагимова Российской академии наук»,
Грозный, Россия
Старший научный сотрудник
Кандидат экономических наук, доцент
E-mail: ayubov@rgsu.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=265314

Клюев Сергей Васильевич

ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова», Белгород, Россия
Профессор кафедры «Теоретической механики и сопротивления материалов»
Доктор технических наук, доцент
E-mail: klyuyev@yandex.ru
РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=529053
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=55863846000>

Литвинов Степан Викторович

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Россия
Доцент кафедры «Сопротивление материалов»
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: litvstep@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5729-1425>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=778540
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57190968515>

**Учет старения бетона при расчете
железобетонных плит на ползучесть**

Аннотация. В статье приводится расчёт квадратной в плане железобетонной плиты, нагруженной равномерно распределённой нагрузкой с учётом развития в бетоне деформаций ползучести. Основные уравнения приводятся для случая плоского напряжённого состояния. Учёт ползучести осуществляется при помощи уравнений вязкоупругой модели наследственного старения. Старение бетона определяется на основе уравнения, включающего значение модуля упругости бетона в начальный момент времени. В расчётах использована мера ползучести, предложенная профессора А.Г. Тамразяном. Приводятся результаты решения модельных задач, учитывающие как наличие старение материала бетона, так и изменение процента армирования плиты, с последующим рассмотрением и сопоставлением полученных результатов. Проведён анализ изменения следующих параметров: прогиба в центре плиты, изменению наибольших напряжений в арматуре и максимальных сжимающих напряжений в бетоне, распределение изгибающего и крутящего моментов. Учёт старения бетона показывает меньшие различия в распределении напряжений в начале и конце ползучести бетона.

Ключевые слова: вязкоупругая модель; ползучесть бетона; плоское напряжённое состояние; железобетонные плиты; численные методы

Введение

Наиболее точный результат расчёт железобетонных плит можно получить только с учётом развития деформаций ползучести в бетоне и его старением.

Основные теории ползучести, используемые в расчёте железобетонных конструкций, были получены независимо разными авторами, но их принято делить на 3 группы: теория старения, теория течения, теория упрочнения и линейная теория наследственности. Подробный анализ теорий ползучести приводится в работах [1–4]. Общими для них являются гипотезы, лежащие в их основах:

1. Бетон принимается как изотропный материал.
2. При уровне напряжений ниже 50 % их прочности, зависимость напряжений и деформаций может быть принята линейной.
3. Приращение напряжений вызывает приращение компоненты деформации ползучести, которая суммируется с полной деформацией.

Карапетян К.А. [5] при помощи названных гипотез построил формулы для расчёта бетонных конструкций и конструкций на его основе.

Взросление бетона происходит непрерывно, начиная с момента его изготовления. Кубиковая прочность R , модуль упругости E , модуль сдвига G , коэффициент Пуассона ν находятся в прямой функциональной зависимости от возраста бетона:

$$R = R(t), E = E(t), G = G(t), \nu = \nu(t).$$

Для зависимости модуля упругости бетона от времени в строительной механике широко используется формула, предложенная Н.Х. Арутюняном [6]:

$$E(t) = E_{\infty}(1 - ae^{-bt}), \quad (1)$$

где E_{∞} — значение модуля упругости $E(t)$ при $t \rightarrow \infty$, a и b — постоянные, полученные в результате лабораторных испытания конкретного бетона.

Явным недостатком формулы (1) является то, что для ее использования необходимо иметь предельное значение E_{∞} , т. е. ждать, когда бетон достаточно повзрослеет. Такого недостатка лишена формула, приведенная в [7]:

$$E(t) = E(\tau_0)[k - (k - 1)e^{-c(t-\tau_0)}], \quad (2)$$

где $E(\tau_0)$ — величина модуля упругости бетона в начальный момент времени при $t = \tau_0$, k и c — постоянные, полученные экспериментальным путем.

Постановка задачи

В качестве закона ползучести будем использовать уравнения вязкоупругой модели наследственного старения [8; 9], которые для плоского напряженного состояния запишутся в виде [10]:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x(t) \\ \varepsilon_y(t) \\ \gamma_{xy}(t) \end{Bmatrix} &= \frac{1}{E(t)} \begin{bmatrix} 1 & -\nu(t) & 0 \\ -\nu(t) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2(1 + \nu(t)) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x(t) \\ \sigma_y(t) \\ \tau_{xy}(t) \end{Bmatrix} - \\ &- \int_{\tau_0}^t \begin{bmatrix} 1 & -\nu(t) & 0 \\ -\nu(t) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2(1 + \nu(t)) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x(t) \\ \sigma_y(t) \\ \tau_{xy}(t) \end{Bmatrix} \frac{\partial C(t, \tau)}{\partial \tau} d\tau, \end{aligned} \quad (3)$$

где $C(t, \tau)$ — мера ползучести, имеющая вид:

$$C(t, \tau) = C \frac{e^{\alpha t} - e^{\alpha \tau}}{e^{\alpha t} - 1} + B(e^{-\gamma \tau} - e^{-\gamma t}). \quad (4)$$

В формуле (4) C, α, γ, B — параметры, определяемые опытным путем.

Изменение коэффициента Пуассона во времени при расчетах, как правило, не учитывается. Экспоненциальная форма меры ползучести позволяет при $\nu = const$ выполнить переход от интегральной формы закона ползучести к дифференциальной.

Из (3) деформации ползучести определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x^* &= - \int_{\tau_0}^t \{ \sigma_x(\tau) - \nu \sigma_y(\tau) \} \frac{\partial C(t, \tau)}{\partial \tau} d\tau = \\ &= \frac{C\alpha}{e^{\alpha t} - 1} \int_{\tau_0}^t e^{\alpha \tau} \{ \sigma_x(\tau) - \nu \sigma_y(\tau) \} d\tau + B\gamma \int_{\tau_0}^t e^{-\gamma \tau} \{ \sigma_x(\tau) - \nu \sigma_y(\tau) \} d\tau; \\ \varepsilon_y^* &= - \int_{\tau_0}^t \{ \sigma_y(\tau) - \nu \sigma_x(\tau) \} \frac{\partial C(t, \tau)}{\partial \tau} d\tau = \\ &= \frac{C\alpha}{e^{\alpha t} - 1} \int_{\tau_0}^t e^{\alpha \tau} \{ \sigma_y(\tau) - \nu \sigma_x(\tau) \} d\tau + B\gamma \int_{\tau_0}^t e^{-\gamma \tau} \{ \sigma_y(\tau) - \nu \sigma_x(\tau) \} d\tau; \\ \gamma_{xy}^* &= -2(1 + \nu) \int_{\tau_0}^t \tau_{xy}(\tau) \frac{\partial C(t, \tau)}{\partial \tau} d\tau = 2(1 + \nu) \left[\frac{C\alpha}{e^{\alpha t} - 1} \int_{\tau_0}^t e^{\alpha \tau} \tau_{xy}(\tau) d\tau + \right. \\ &\quad \left. B\gamma \int_{\tau_0}^t e^{-\gamma \tau} \tau_{xy}(\tau) d\tau \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

Представим деформации ε_x^* и ε_y^* и γ_{xy}^* в виде суммы двух составляющих:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x^* &= \varepsilon_{1x}^* + \varepsilon_{2x}^*; \quad \varepsilon_y^* = \varepsilon_{1y}^* + \varepsilon_{2y}^*; \quad \gamma_{xy}^* = \gamma_{1xy}^* + \gamma_{2xy}^*; \\ \varepsilon_{1x}^* &= \frac{C\alpha}{e^{\alpha t} - 1} \int_{\tau_0}^t e^{\alpha \tau} \{ \sigma_x(\tau) - \nu \sigma_y(\tau) \} d\tau; \\ \varepsilon_{2x}^* &= B\gamma \int_{\tau_0}^t e^{-\gamma \tau} \{ \sigma_x(\tau) - \nu \sigma_y(\tau) \} d\tau; \\ \varepsilon_{1y}^* &= \frac{C\alpha}{e^{\alpha t} - 1} \int_{\tau_0}^t e^{\alpha \tau} \{ \sigma_y(\tau) - \nu \sigma_x(\tau) \} d\tau; \\ \varepsilon_{2y}^* &= B\gamma \int_{\tau_0}^t e^{-\gamma \tau} \{ \sigma_y(\tau) - \nu \sigma_x(\tau) \} d\tau; \\ \gamma_{1xy}^* &= \frac{2(1+\nu)C\alpha}{e^{\alpha t} - 1} \int_{\tau_0}^t e^{\alpha \tau} \tau_{xy}(\tau) d\tau; \quad \gamma_{2xy}^* = 2(1 + \nu) B\gamma \int_{\tau_0}^t e^{-\gamma \tau} \tau_{xy}(\tau) d\tau. \end{aligned} \quad (6)$$

Дифференцируя ε_{1x}^* и ε_{2x}^* по времени t , получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon_{1x}^*}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{C\alpha}{e^{\alpha t} - 1} \right) \int_{\tau_0}^t e^{\alpha\tau} \{ \sigma_x(\tau) - \nu\sigma_y(\tau) \} d\tau + \\ &+ \frac{C\alpha}{e^{\alpha t} - 1} \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{\tau_0}^t e^{\alpha\tau} \{ \sigma_x(\tau) - \nu\sigma_y(\tau) \} d\tau \right) = \\ &= - \frac{C\alpha^2 e^{\alpha t}}{(e^{\alpha t} - 1)^2} \int_{\tau_0}^t e^{\alpha\tau} \{ \sigma_x(\tau) - \nu\sigma_y(\tau) \} d\tau + \frac{C\alpha e^{\alpha t}}{e^{\alpha t} - 1} (\sigma_x(t) - \nu\sigma_y(t)) = \\ &= \frac{\alpha e^{\alpha t}}{e^{\alpha t} - 1} (C \{ \sigma_x(t) - \nu\sigma_y(t) \} - \varepsilon_{1x}^*). \\ \frac{\partial \varepsilon_{2x}^*}{\partial t} &= B\gamma \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{\tau_0}^t e^{-\gamma\tau} \{ \sigma_x(\tau) - \nu\sigma_y(\tau) \} d\tau \right) = B\gamma e^{-\gamma t} (\sigma_x(t) - \nu\sigma_y(t)). \end{aligned} \quad (7)$$

Аналогично можно получить выражения для ε_{1y}^* , ε_{2y}^* , γ_{1xy}^* , γ_{2xy}^* :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon_{1y}^*}{\partial t} &= \frac{\alpha e^{\alpha t}}{e^{\alpha t} - 1} (C \{ \sigma_y(t) - \nu\sigma_x(t) \} - \varepsilon_{1y}^*); \\ \frac{\partial \varepsilon_{2y}^*}{\partial t} &= B\gamma e^{-\gamma t} (\sigma_y(t) - \nu\sigma_x(t)); \\ \frac{\partial \gamma_{1xy}^*}{\partial t} &= \frac{\alpha e^{\alpha t}}{e^{\alpha t} - 1} [2(1 + \nu)C\tau_{xy}(t) - \gamma_{1xy}^*]; \\ \frac{\partial \gamma_{2xy}^*}{\partial t} &= 2(1 + \nu)B\gamma e^{-\gamma t} \tau_{xy}(t). \end{aligned} \quad (8)$$

Выражения (7) и (8) позволяют использовать для расчета метод Эйлера или Рунге-Кутты.

Методика расчета

Приведем расчет шарнирно опертой по контуру плиты размерами 2x2 м, загруженной равномерно распределенной по площади нагрузкой $q = 2$ кПа, при $h = 12,2$ см, $E_{b0} = 3 \cdot 10^4$ МПа, $\nu = 0,2$, $\mu_{sx} = \mu_{sy} = 0,005$, $\mu'_{sx} = \mu'_{sy} = 0$, $z_{sx} = 4,7$ см, $z_{sy} = 4$ см.

Для зависимости модуля упругости бетона от времени использовалась формула (2) с параметрами $k = 1,282$, $c = 0,019$. Реологические постоянные бетона: $C = 3,77 \cdot 10^{-8}$ м²/кН, $B = 5,68 \cdot 10^{-8}$ м²/кН, $\alpha = 0,032$ сут⁻¹; $\gamma = 0,062$ сут⁻¹.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 приведен полученный в результате график роста прогиба в центре плиты. Штриховой линии соответствует результат без учета старения бетона ($E_b(t) = const$).

При учете изменения модуля упругости бетона во времени прогиб в конце процесса ползучести оказывается ниже на 9,4 %.

Рисунок 2 — изменение во времени максимальных напряжений σ_{sx} .

Для нестареющего бетона напряжения в арматуре в процессе ползучести выросли в 2,29 раз, а для стареющего — в 2,1 раз.

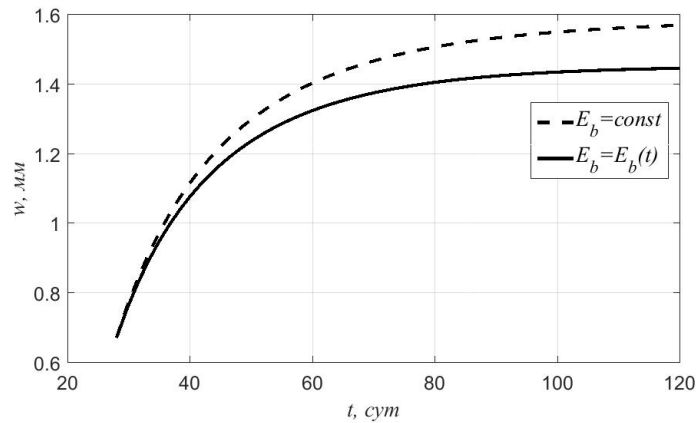


Рисунок 1. График роста прогиба в центре плиты (составлено/разработано автором)

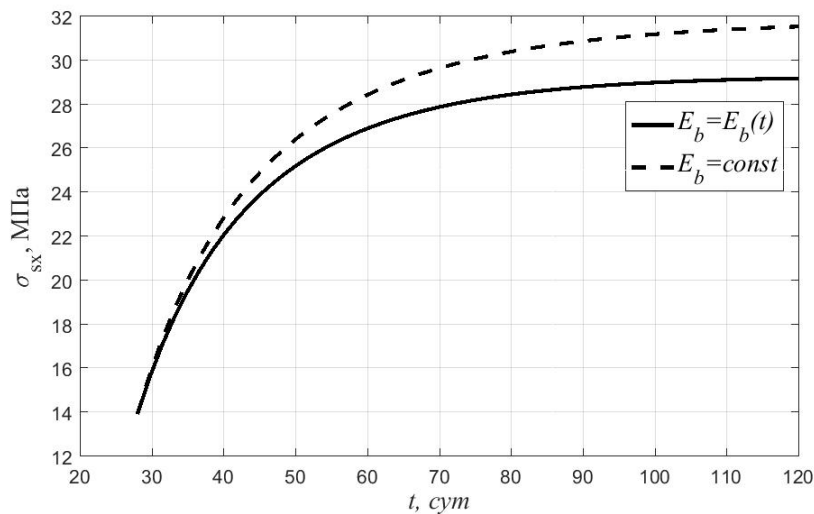


Рисунок 2. Изменение максимальных напряжений в арматуре во времени (составлено/разработано автором)

Изменение максимальных сжимающих напряжений в бетоне приведено на рисунке 3. В случае несимметричного армирования напряжения в бетоне во времени практически не меняются, независимо от того, стареет бетон или нет.

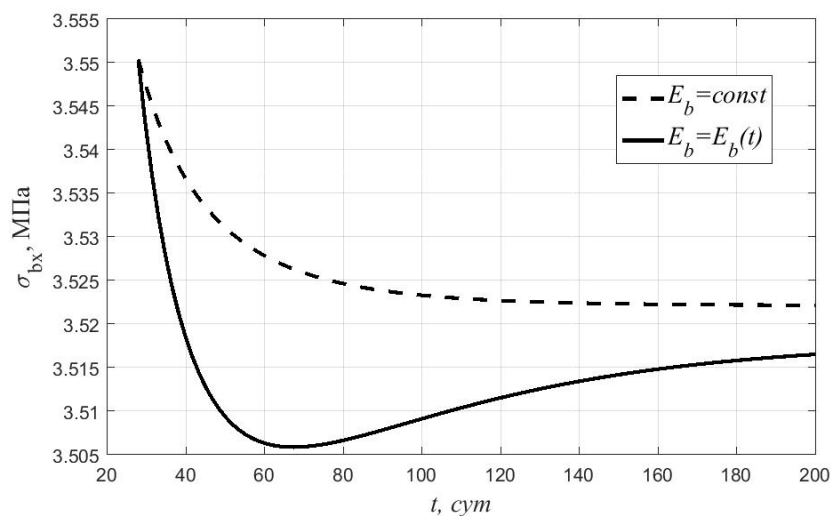


Рисунок 3. Изменение максимальных сжимающих напряжений в бетоне (составлено/разработано автором)

На рисунке 4 приведены графики изменения во времени наибольших касательных напряжений τ_{bxy} . Разница между напряжениями в начале и конце процесса ползучести для нестареющего бетона составляет 4,19 %, а для стареющего — 3,96 %. Внутренние усилия в процессе ползучести практически не меняются. Распределение в зависимости от x и y изгибающего момента M_x , а также крутящего момента H при $t = 200$ ч приведено соответственно на рисунках 5 и 6.

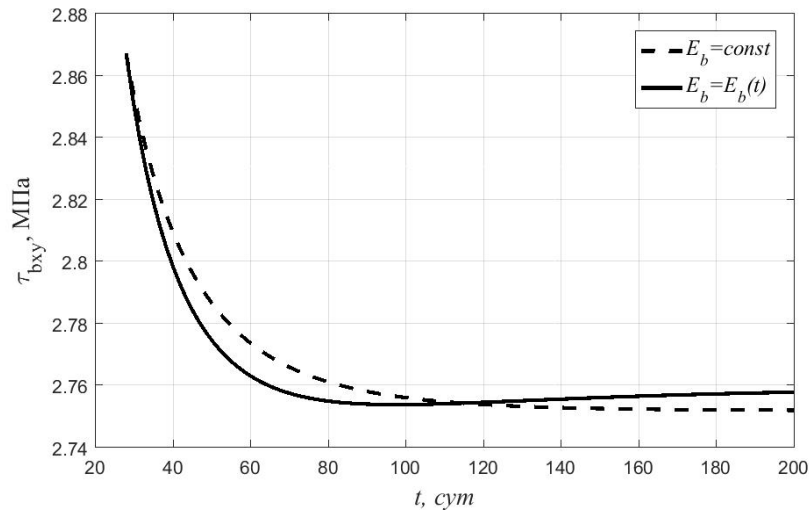


Рисунок 4. Изменение во времени наибольших касательных напряжений в бетоне (составлено/разработано автором)

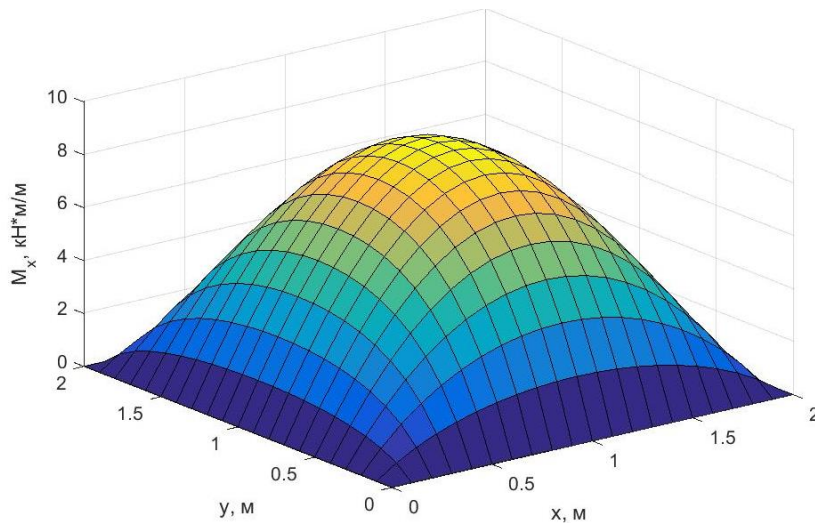


Рисунок 5. Распределение изгибающего момента M_x в зависимости от x и y при $t = 200$ ч (составлено/разработано автором)

Также был выполнен расчет при симметричном армировании:

$$\mu_{sx} = \mu_{sy} = \mu'_{sx} = \mu'_{sy} = 0,005.$$

Графики изменения максимальных напряжений в растянутой арматуре для случая стареющего и нестареющего бетона приведены на рисунке 7.

Рисунок 8 показывает изменение во времени максимальных сжимающих напряжений σ_{bx} . Разница между напряжениями в начале и в конце процесса ползучести составляет 7,37 % для нестареющего бетона и 6,55 % для стареющего бетона.

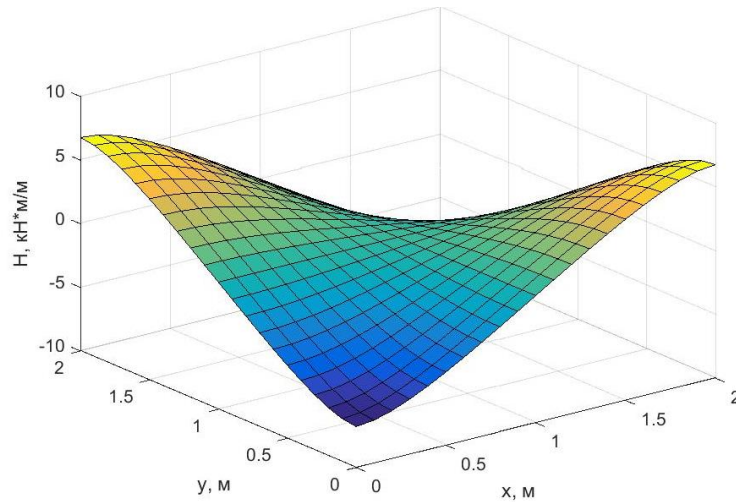


Рисунок 6. Распределение крутящего момента в зависимости от x и y при $t = 200$ ч (составлено/разработано автором)

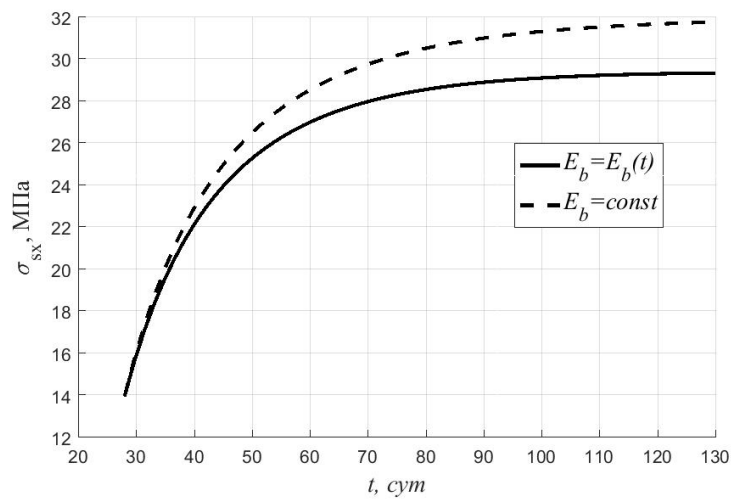


Рисунок 7. Изменение максимальных напряжений в растянутой арматуре (составлено/разработано автором)

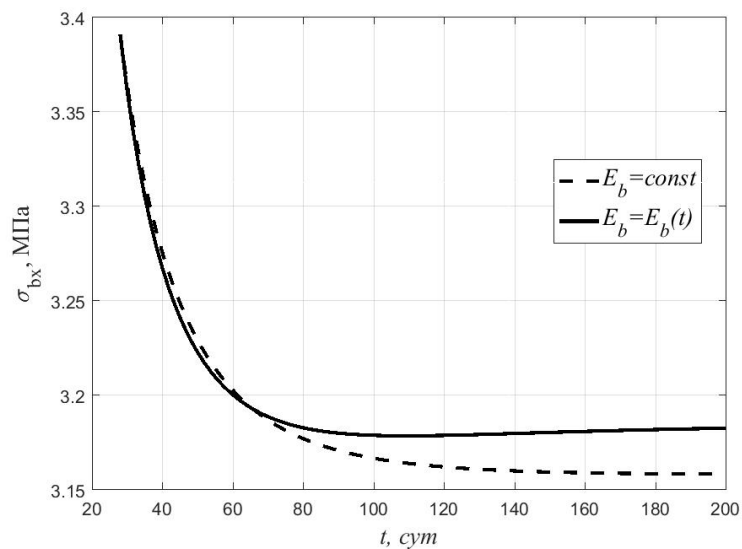


Рисунок 8. Изменение во времени максимальных сжимающих напряжений в бетоне (составлено/разработано автором)

Выводы

В настоящей работе приведены разрешающие уравнения и методика расчета железобетонных плит с учетом ползучести на основе вязкоупругой реологической модели. Предложенная методика является универсальной, что позволяет использовать различные уравнения связи и для различных материалов.

Представлено теоретическое исследование реологических аспектов железобетонных плит на основе следующих теорий: теория старения, теория течения и теория упрочнения. Установлено, что при использовании теорий старения и упрочнения результаты в конце процесса ползучести практически не отличаются.

Рассмотренные варианты симметричного и несимметричного армирования выявили следующее: для случая симметричного армирования обнаружено существенное перераспределение напряжений между арматурой и бетоном: в арматуре напряжения в процессе ползучести возрастают до 3,5 раз, а в бетоне убывают на 30 %.

В случае несимметричного армирования, при отсутствии верхней арматуры максимальные сжимающие напряжения в бетоне во времени практически не меняются.

Исследовано влияние старения бетона на напряженно-деформированное состояние железобетонных плит при ползучести.

Установлено, что для стареющего бетона рост перемещений и перераспределение напряжений менее выражены, чем для нестареющего.

Исследовано влияние старения бетона на напряженно-деформированное состояние железобетонных плит при ползучести. Установлено, что для стареющего бетона рост перемещений и перераспределение напряжений менее выражены, чем для нестареющего.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гольденблат, И.И. Теория ползучести строительных материалов / И.И. Гольденблат, Н.А. Николаенко. — М.: Гостехиздат, 1960. — 256 с.
2. Башинская, О.Ю. Сравнительный анализ методов численного моделирования пластических деформаций бетона / О.Ю. Башинская, М.С. Барабаш // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения. — 2016. — № 91. — С. 32–39.
3. Крылов, С.Б. Современные исследования в области теории ползучести бетона / С.Б. Крылов, П.Д. Арленинов // Вестник НИЦ Строительство. — 2018. — № 1. — С. 67–75.
4. Санжаровский, Р.С. Нелинейная теория ползучести бетона и железобетона и современные нормы / Р.С. Санжаровский, М.М. Манченко // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. — 2017. — № 1. — С. 23–35.
5. Карапетян, К.А. Исследование ползучести и релаксации напряжений в бетоне с учётом его старения / К.А. Карапетян, А.М. Симонян // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. — 2008. Т. LIII, № 1. — С. 27–34.
6. Арутюнян, Н.Х. Расчет строительных конструкций с учетом ползучести / Н.Х. Арутюнян, А.А. Зевин. — Стройиздат, 1988. — 256 с.

7. Есаян, С.Г. Реологическое моделирование вязкоупругих, упругопластических и вязкоупруго-пластических сред / С.Г. Есаян. — Ереван: Чартарагет. 2009. — 368 с.
8. Sanzharovskij, R.S. Non-linear hereditary creep theory / R.S. Sanzharovskij // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. — 2014. — № 1. — С. 63–68.
9. Тамразян, А.Г. Экспериментальные исследования параметра нелинейности при расчете деформаций ползучести и усадки мелкозернистого бетона / А.Г. Тамразян, С.Г. Парфенов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. — 2017. — № 6. — С. 284–289.
10. Тамразян, А.Г. Механика ползучести бетона: монография / А.Г. Тамразян, С.Г. Есаян. — Москва: МГСУ, 2012. — 490 с.

Gatiev Magomed Shamilevich

Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, Grozny, Russia
Ingush State University, Magas, Russia
E-mail: guvho@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0948-4497>

RSCI: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=717490

Ayubov Narman Ayubovich

Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, Grozny, Russia
E-mail: ayubov@rgsu.ru

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=265314

Klyuev Sergey Vasil'yevich

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia
E-mail: klyuev@yandex.ru

RSCI: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=529053

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=55863846000>

Litvinov Stepan Victorovich

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia
E-mail: litvstep@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5729-1425>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=778540

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57190968515>

Taking into account concrete aging when calculating reinforced concrete slabs for creep

Abstract. The article provides a calculation of a square reinforced concrete slab loaded with a uniformly distributed load, taking into account the development of creep deformations in concrete. The basic equations are given for the case of a plane stress state. Creep is taken into account using the equations of the viscoelastic model of hereditary aging. The aging of concrete is determined based on an equation that includes the value of the elastic modulus of concrete at the initial time. The calculations used the creep measure proposed by prof. A.G. Tamrazyan. The results of solving model problems are presented, taking into account both the presence of aging of the concrete material and the change in the percentage of slab reinforcement, followed by consideration and comparison of the results obtained. An analysis of changes in the following parameters was carried out: deflection in the center of the slab, changes in the highest stresses in the reinforcement and maximum compressive stresses in concrete, the distribution of bending and torque moments. Taking into account the aging of concrete shows smaller differences in the stress distribution at the beginning and end of concrete creep.

Keywords: viscoelastic model; concrete creep; plane stress state; reinforced concrete slabs; numerical methods