

УДК 624.012+666.982

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-4\(35\)-80-87](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-4(35)-80-87)

EDN: UJIFOD

НЕКОТОРЫЕ СООБРАЖЕНИЯ О ПОСТРОЕНИИ СОВРЕМЕННОЙ ТЕОРИИ РАСЧЕТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

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. Действующие нормативные документы в области бетона и железобетона базируются в основном на результатах исследований, полученных еще в прошлом веке.

Цель. Авторами статьи решается важная и актуальная задача, направленная на совершенствование теории расчета бетонных и железобетонных конструкций с учетом накопленных к настоящему моменту знаний.

Материалы и методы. Бетонные конструкции относятся к неконсервативным системам. Следовательно, некорректно определять возникающие в них усилия, применяя стандартные методы строительной механики. Для достижения поставленной цели авторами решаются деформационная и релаксационная задачи для центрально сжатого бетонного волокна. Решение, приведенное в статье, выполняется в соответствии с положениями двухкомпонентной теории ползучести А.А. Гвоздева и К.З. Галустова. Согласно данной теории деформации разделяются по признаку обратимости.

Результаты. Приведена история развития вопроса. Авторами предложено решение деформационной и релаксационной задач для элементарной части бетонной конструкции для случая центрального сжатия. В действительности такая ситуация невозможна. В связи с этим оценивать потерю устойчивости по Эйлеру также представляется некорректным. Отмечается, что достижение конструкцией предельной несущей способности эквивалентно ситуации нулевой отпорности. При этом имеет место прогрессирующее разрушение. Для дальнейшего решения авторы предлагают применять закон о прямых нормалях, подчеркивая, что данный закон справедлив в случае отсутствия касательных напряжений в рассматриваемых сечениях конструкции.

Выводы. Совершенствование теории расчета бетонных и железобетонных конструкций требует кардинального пересмотра сложившегося отношения к организации научных исследований.

Ключевые слова: бетон, деформационная задача, диссипативная теория, ползучесть бетона, теория ползучести, релаксационная задача, центральное волокно, центральное сжатие

Для цитирования: 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)

Вклад авторов

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 28.10.2022

Поступила после рецензирования 10.11.2022

Принята к публикации 29.11.2022

CALCULATION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES: CONSIDERATIONS ON DEVELOPING NEW THEORY

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. Current regulatory documents in the field of concrete and reinforced concrete are based mainly on research results obtained in the past century.

Aim. This article addresses the approaches to improve the theory of calculation of concrete and reinforced concrete structures, in the light of the accumulated knowledge.

Materials and methods. Since concrete structures belong to non-conservative systems, it is inaccurate to determine the forces arising in them using standard methods of structural mechanics. To achieve this goal, the deformation and relaxation problems for an axially compressed concrete fiber were solved following the A.A. Gvozdev and K.Z. Galustov's two-component theory of creep, where deformations are categorized on the basis of reversibility.

Results. Historical background was provided. Proposed by the authors of this article is a solution to the deformation and relaxation problems for the elementary part of a concrete structure for the case of axial compression, since such an event is impossible. In this regard, it was suggested that estimating the loss of stability by Euler is also incorrect. It was observed that the achieved maximum load-bearing capacity of the construction is equivalent to zero resistibility, with a progressive collapse occurring. For further research, it was proposed to use the hypothesis of a straight normal, assuming that this law is valid in the absence of tangential stresses in the studied sections of the structure.

Conclusions. To improve the theory of calculation of concrete and reinforced concrete structures, it is necessary to revise drastically the existing approach to scientific research.

Keywords: concrete, deformation problem, dissipative theory, creep of concrete, creep theory, relaxation problem, central fiber, axial compression

For citation: Nazarenko V.G., Zvezdov A.I., Larionov E.A. Calculation of reinforced concrete structures: considerations on developing new theory. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2022;35(4):80–87. (In Russ.) [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-4\(35\)-80-87](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-4(35)-80-87)

Author contribution statements

All authors have made an equivalent contribution to the preparation of the article.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 28.10.2022

Revised 10.11.2022

Accepted 29.11.2022

Введение

Касаясь назревших вопросов развития норм по проектированию и производству железобетонных конструкций [1], авторы приводят очевидный факт о том, что действующие нормы базируются в основном на результатах исследований, полученных еще в прошлом веке. Нормы проектирования обычно содержат базу данных о показателях прочностных и деформативных свойств бетона и арматуры, методов расчета конструкций и различных требований (конструктивных, по изготовлению и монтажу и т. д.).

Цель

Несовершенство базы данных достаточно полно рассмотрено в [1]. В данной статье основное внимание уделено вопросу совершенствования теории расчета бетонных и железобетонных конструкций.

Материалы и методы

В соответствии с результатами двухкомпонентной теории ползучести А.А. Гвоздева и К.З. Галустова [2] ниже рассматриваются деформационная и релаксационная задачи компонентов обратимых деформаций ползучести бетона. По определению А.А. Гвоздева, теория расчета только тогда может быть полной, если решены две задачи: деформационная и релаксационная. В настоящее время решение деформационной задачи представлено многочисленными вариантами теории ползучести, опирающимися на многочисленные предпосылки и допущения. Наиболее дискуссионным из них является принцип суперпозиции. Определение внутренних усилий в элементах конструкций осуществляется с помощью методов строительной механики, которые справедливы только для консервативных систем. Конструкции, в которых используется бетон, рассеивают энергию на необратимых деформациях, и система становится неконсервативной. Поэтому существенно важно выделение их из общих деформаций. На это указывал А.А. Гвоздев. Им разработана и впоследствии развита К.З. Галустовым двухкомпонентная теория ползучести, в которой деформации разделены не по признаку упругости и неупругости, а по признаку обратимости. По сути, в ней находятся истоки диссипативной теории ползучести.

Результаты

В 1660 году Р. Гук сформулировал закон, определяющий связь между напряжением и деформацией упругого тела. Тогда и появилось в научной среде понятие о модуле упругости Юнга. Подавляющее большинство научных работ и до настоящего времени используют это понятие в теории железобетона, назвав его модулем упругости или деформаций. Впервые на неупругие свойства бетона обратил внимание А. Консидер (публикация в 1905 г.), то есть на 245 лет позднее. Этот момент можно считать началом рождения науки о ползучести. По молодости своей, по сравнению с теорией упругости, наука о ползучести в общей теории железобетона и сейчас является инструментом для сглаживания расхождений

теории и опыта. Заметим, что до настоящего времени все известные теории ползучести не вписаны в существо теории железобетона, а существуют рядом с ней, по крайней мере в нормативных документах. Это привело к тому, что старение бетона определено различными эмпирическими зависимостями для упругости и ползучести. Уравнения состояния, построенные на них, удовлетворяют опыту, но применить их к решению практических задач трудоемко, т. к. они не приводятся к дифференциальным уравнениям, разрешаемым в элементарных функциях. Поэтому стандартным методом решения релаксационных задач в линейной теории ползучести является предварительное определение ядра релаксации, сопряженного с медленно сходящимся рядом [2]. Применение преобразования Лапласа в сочетании с методом малого параметра Пуанкаре, кроме всего прочего, многодельно и труднообозримо.

В 1978 году [3] С.В. Александровский и В.В. Соломонов установили в опытах, что деформации ползучести, удельные по отношению к начальному относительному уровню напряжений $\eta(\tau) = \sigma(\tau)/R(\tau)$, практически не зависят от возраста бетона, т. е. инвариантны относительно начала нагружения. Этот замечательный факт долго не был замечен научной общественностью. И только к 1989 году [4] он позволил установить тесную связь между тремя свойствами бетона (прочностью, упругостью и ползучестью). Удалось показать, что у всех компонент напряженно-деформированного состояния бетона (прочности, упругости и ползучести) существует одна общая функция старения, определяемая количеством прогидратированного вяжущего. Полученный результат позволил сформулировать для теории ползучести бетона обыкновенное дифференциальное уравнение (ОДУ) первого порядка, решаемого в элементарных функциях. При этом отпала необходимость многих ограничений, используемых при построении существующих теорий ползучести. Полученное ОДУ позволяет формулировать как задачу определения деформации при заданном режиме напряжения, так и задачу определения напряжения при заданном режиме деформации в элементарных функциях. Покажем это ниже по тексту.

В действующих нормах [5, 6] общая мера деформаций бетона или его податливость при одноосном простейшем нагружении представлена в виде:

$$\delta(t, \tau) = \frac{1}{E(\tau)} + C(t, \tau), \quad (1)$$

где мера ползучести принимается в мультипликативной форме С.В. Александровского и МакГенри, развитой Е.Н. Щербаковым

$$C(t, \tau) = C(\infty, 28) \theta(\tau) f(t - \tau), \quad (2)$$

$$\text{где } f(t - \tau) = 1 - k e^{-\gamma_1(t - \tau)} \quad (3)$$

$f(t - \tau)$ – функция накопления деформаций ползучести.

Функция старения по [3]

$$\theta(\tau) = \frac{R(28)}{R(\tau)} = \frac{E(28)}{E(\tau)} = \frac{C(\infty, \tau)}{C(\infty, 28)}. \quad (4)$$

Подставив (4) в (1), получим

$$\delta(t, \tau) = \frac{\theta(\tau)}{E(28)} + \theta(\tau) C(\infty, 28) f(t - \tau) = \theta(\tau) \left[\frac{1}{E(28)} + C(\infty, 28) f(t - \tau) \right].$$

При простом, но разном одноосном сжатии напряжением $\sigma(\tau)$ относительные деформации в момент t

$$\varepsilon(t, \tau) = \eta(\tau) (a - b e^{-\gamma(t-\tau)}), \quad (5)$$

$$\text{где } a = \varepsilon_R (1 + \varphi) b = \varepsilon_R k \varphi \varepsilon_R = \frac{R(28)}{E(28)}$$

или

$$\varepsilon(t, \tau) = \eta(\tau) \varepsilon_R [1 + \varphi f(t - \tau)]. \quad (5a)$$

Поскольку причиной деформаций являются напряжения, а (5) оперирует их уровнями согласно [3], то свойства бетона и сами деформации инвариантны относительно времени приложения этих уровней. Тогда скорость деформации

$$d\varepsilon(t, \tau) = d\eta(\tau) (a - b e^{-\gamma(t-\tau)}) \quad (6)$$

или

$$d\varepsilon(t, \tau) = d\eta(\tau) \varepsilon_R [1 + \varphi f(t - \tau)]. \quad (6a)$$

Принципиально важно отметить, что (6) есть дифференциальное уравнение и получено оно так же, как и большинство признанных в теории ползучести средств построения уравнений состояния, например, [7]. Однако в существующих теориях они не могут решаться в элементарных функциях, и это вынуждает применять трудоемкие приближенные способы решения. Наверное, в этом заключается одна из главных причин слабого использования теории ползучести в теории железобетона. В отличие от этого (6) решается в элементарных функциях, и этому способствует (4), полученное [4] на основе [3]. Дифференциальное уравнение (6) позволяет построить уравнение деформаций прямым интегрированием

$$\varepsilon(t, \tau) \Big|_{t_0}^t = a \eta(\tau) \Big|_{t_0}^t - b \int_{t_0}^t e^{-\gamma(t-\tau)} \frac{\partial \eta(\tau)}{\partial \tau} d\tau,$$

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

Согласно (5), $\varepsilon(t, t) = \eta(t) (a - b)$, тогда

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

$$\varepsilon(t, t_0) = a\eta(t_0) - b\eta(t) + be^{-\gamma t} \int_{t_0}^t e^{\gamma \tau} \frac{\partial \eta(\tau)}{\partial \tau} d\tau. \quad (7)$$

Так может решаться прямая задача теории ползучести при одноосном сжатии бетонных элементов. На практике зачастую требуется решать обратную задачу: по заданным вынужденным деформациям требуется определить уровень напряжения. Это задача о релаксации, которая может быть решена с помощью решения дифференциального уравнения.

Для того чтобы получить классический вид линейного дифференциального уравнения первого порядка [8], имеющего стандартное решение, прибавим к (6) помноженное на γ уравнение (5) и получим

$$\eta'(\tau) + \gamma\eta(\tau) = \frac{\varepsilon'(t, \tau) + \gamma\varepsilon(t, \tau)}{a - be^{-\gamma(t-\tau)}} = f(\tau). \quad (8)$$

Для нахождения общего решения уравнения (8) применяем, как обычно, метод вариации постоянной. Однородное уравнение $\eta'(\tau) + \gamma\eta(\tau) = 0$ является уравнением с разделяющимися переменными. Разделяя переменные и интегрируя, имеем $\frac{d\eta(\tau)}{\eta(\tau)} = -\gamma d\tau$, $\ln|\eta(\tau)| = -\gamma\tau + \ln|C_1|$.

Отсюда, потенцируя, находим

$$\eta(\tau) = \pm C_1 e^{-\gamma\tau} \text{ или } \eta(\tau) = C e^{-\gamma\tau}. \quad (9)$$

Теперь найдем общее решение уравнения (8) в виде (9), где C будем считать не постоянной, а новой неизвестной функцией от τ (в этом смысл метода), т. е. в виде

$$\eta(\tau) = C(\tau) e^{-\gamma\tau}. \quad (10)$$

Чтобы найти функцию $C(\tau)$ и, тем самым, решение в виде (10), подставим функцию (10) в уравнение (8). Получим $C'(\tau) = f(\tau)e^{\gamma\tau}$, а интегрируя, получим

$$C(\tau) = \int f(\tau) e^{\gamma\tau} d\tau + C_1.$$

Подставляя полученное в соотношение (10), получаем общее решение уравнения (8)

$$\eta(\tau) = C_1 e^{-\gamma\tau} + e^{-\gamma\tau} \int f(\tau) e^{\gamma\tau} d\tau. \quad (11)$$

Согласно (5) $\eta(t_0) = \frac{\varepsilon(t, t_0)}{(a - be^{-\gamma(t-t_0)})}$ и тогда

$$C_1 = \frac{\varepsilon(t, t_0) e^{\gamma t_0}}{(a - be^{-\gamma(t-t_0)})} - \int f(t_0) e^{\gamma t_0} dt_0. \quad (12)$$

Уравнение (11) позволяет определять уровень напряжения в интервале активных вынужденных деформаций $t - t_0$.

Если интегрировать уравнение (6а), то получим желаемый результат в другом, но эквивалентном виде

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

или

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

Обозначим $a = 1 + \varphi$ и $b = -\varphi k e^{-\gamma t}$, подставив их в предыдущее выражение, получим

$$\eta(t) \varepsilon_R = \int_{t_0}^t \frac{1}{a + b e^{\gamma \tau}} \frac{\partial \varepsilon(t, \tau)}{\partial \tau} d\tau + \frac{\varepsilon(t, t_0)}{a + b e^{\gamma t_0}}. \quad (14)$$

Выводы

Получено решение деформационной и релаксационной задач для центрально сжатого бетонного волокна, представляющего элементарную часть бетонной конструкции с однородными свойствами при центральном сжатии. В природе таких конструкций не существует и, как следствие, для них не существует однородного напряженно-деформированного состояния. Доказательством тому является общепризнанный случайный эксцентриситет. Поэтому теряют корректность расчеты потери устойчивости по Эйлеру как момент достижения конструкцией смены формы равновесия (бифуркации). Не меняется форма равновесия, т. к. не существует центрального сжатия.

Критерий потери устойчивости по А.В. Гиммерлингу, заключающийся в достижении конструкцией нулевой отпорности, эквивалентен достижению предельной несущей способности и сродни предельному равновесию. При этом рассматривается конструкция в целом, т. к. предел может наступить как в результате разрушения одного, так и нескольких элементов. Что станет с остальными элементами – этот непростой вопрос относится к теории прогрессирующего разрушения.

В современной практике в обход упомянутых трудностей используется закон о прямых нормалях. На самом деле он справедлив только тогда, когда в рассматриваемых сечениях конструкции отсутствуют касательные напряжения. В этом случае плоские сечения до деформаций остаются плоскими после деформаций. Это явление имеет строгое доказательство. В связи с отсутствием касательных напряжений в поперечном сечении в силу свойства парности они отсутствуют в продольном сечении. Тогда волокна по высоте сечения следуют закону о прямых нормалях независимо от соседних сверху и снизу волокон. Но ведь это очень редкий случай. Однако такие сечения можно легко найти в любом месте конструкции. Тогда возникает возможность с единых позиций рассматривать напряженно-деформированное состояние (НДС) в случае чистого изгиба, действия поперечной силы, кручения и т. д. Но чтобы поднять этот пласт, следует уже сегодня кардинально пересмотреть сложившиеся отношения к организации научных исследований. Завтра будет поздно.

Список литературы

1. Несветаев Г.В. К вопросу о развитии норм по проектированию и производству железобетонных конструкций. Бетон и железобетон. 2020;(1):4–9.
2. Галустов К.З. Исследования линейной ползучести бетона при переменных ступенчато изменяющихся нагрузках [диссертация]. Москва; 1967.
3. Александровский С.В., Соломонов В.В. Зависимость деформаций ползучести стареющего бетона от начального уровня напряжений. В: Межотраслевые вопросы строительства. Отечественный опыт. Реферативный сборник. Москва: ЦИНИС Госстроя СССР; 1972. вып. 6. с. 6–12.
4. Назаренко В.Г. Развитие основ теории расчета железобетонных конструкций с учетом особенностей режимного нагружения [диссертация]. Москва; 1990.
5. ГОСТ 24452-80. Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона. Москва: Издательство стандартов; 1988.
6. ГОСТ 24544-81. Государственный стандарт Союза ССР. Бетоны. Методы определения деформации усадки и ползучести. Москва: Издательство стандартов; 1988.
7. Бондаренко В.М. Некоторые вопросы нелинейной теории железобетона. Харьков: Изд-во Харьковского ун-та; 1968.
8. Шипачев В.С. Высшая математика. Москва: Высшая школа; 1998.

References

1. Nesvetaev G.V. On the development of standards for the design and production of reinforced concrete structures. Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete]. 2020;(1):4–9 (in Russian).
2. Galustov K.Z. Studies of linear creep of concrete under variable stepwise varying loads [dissertation]. Moscow; 1967 (in Russian).
3. Alexandrovsky S.V., Solomonov V.V. Dependence of creep deformations of aging concrete on the initial stress level. In: Intersectoral issues of construction. Domestic experience. Abstract Collection. Moscow: TSINIS Gosstroy of the USSR; 1972. issue 6. p. 6–12 (in Russian).
4. 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).
5. State Standard 24452-80. Concrete. Methods for determining the prismatic strength, modulus of elasticity and Poisson's ratio. Moscow: Publishing House of Standards; 1988 (in Russian).
6. State Standard 24544-81. State standard of the USSR. Concrete. Methods for determining shrinkage and creep deformation. Moscow: Publishing House of Standards; 1988 (in Russian).
7. Bondarenko V.M. Some questions of the nonlinear theory of reinforced concrete. Kharkiv: Publishing house of Kharkiv University; 1968 (in Russian).
8. Shipachev V.S. Higher mathematics. Moscow; Vysshaya shkola; 1998 (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
Andrey I. Zvezdov✉, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Deputy General Director for Academic Affairs, JSC Research Center of Construction, Moscow

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