

УДК 624.044.3

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ТЕРМОПОЛЗУЧЕСТИ БЕТОНА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

БАШИНСКАЯ О.Ю.¹, *аспирант*
ПИКУЛЬ А.В.², *асистент*
БАРАБАШ М.С.³, *д.т.н., проф.*

¹ Кафедры компьютерных технологий строительства, Национальный авиационный университет, проспект Космонавта Комарова, 1, Киев, 03058; тел: +38 (063) 108-22-01; e-mail: olchik01@ukr.net; <http://orcid.org/0000-0002-4161-782X>;

² Кафедры металлических и деревянных конструкций Киевский национальный университет строительства и архитектуры, проспект Воздухофлотский, 31, Киев, 03037; тел: +38 (097) 217-68-79 ; e-mail: anatol.pikul@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0002-1516-8266>;

³ Кафедра компьютерных технологий строительства, Национальный авиационный университет, проспект Космонавта Комарова, 1, Киев, 03058; тел: +38 (095) 286-39-90; e-mail: bmari.lira@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0003-2157-521X>.

Аннотация. В последнее время методы расчета зданий и сооружений на прочность и жесткость стремительно развиваются в направлении все более полного учета действительных условий работы конструкции. Настоящая работа посвящена исследованию напряженно деформированного состояния бетонных и железобетонных конструкций при наличии вынужденных деформаций с учетом ползучести. Вынужденные деформации часто появляются в молодом возрасте бетона, а их последствие сохраняется длительный период времени. Основное содержание статьи заключается в рассмотрении теории расчета сооружений на основе представления о конструкциях как об идеальных упруго-пластических системах. Кроме того, приведены основные понятия о расчете упруго-вязких систем, обладающих свойствами изменять своё напряженное состояние во времени. В статье также рассмотрен процесс математического моделирования полных деформаций железобетонных конструкции при эксплуатации в условиях воздействия высоких температур, или с учетом влияния экзотермии при твердении массивных бетонных конструкций. Поскольку основные зависимости между геометрическими и физическими величинами в теории упругости и пластичности выводятся на элементах дифференциально малых размеров и зависимости между этими величинами распространяются с бесконечно малых элементов на всю рассматриваемую область, то в основе любых исследований напряженно-деформированного состояния конструкций лежит метод физической дискретизации рассматриваемого объекта. Поэтому в данной статье большое внимание уделено процессу реализации температурной функции ползучести в конечно-элементном методе расчета зданий и сооружений. Приведены результаты верификации рассмотренной функции ползучести путём сравнения аналитических решений с экспериментальными данными, полученными при различных значениях изменения температуры окружающей среды испытываемых образцов. Особое внимание уделено теории тепло- и влажпроводности бетона, интенсивность которых зависит от температуры, а также упруго-мгновенным свойствам тел, которые зависят от возраста бетона. Полученные результаты исследования позволяют более точно анализировать напряженно-деформированное состояния конструкций, которое вызвано изменением температуры и влажности бетона с учетом ползучести.

Ключевые слова: экзотермия, энтальпия, метод конечных элементов, термическая дилатация, температурные напряжения

ВИРШЕННЯ ЗАДАЧІ ТЕРМОПОВЗУЧОСТІ БЕТОНУ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

БАШИНСКАЯ О.Ю.¹, *аспирант*
ПИКУЛЬ А.В.², *асистент*
БАРАБАШ М.С.³, *д.т.н., проф.*

¹ Національний авіаційний університет, проспект Космонавта Комарова, 1, Київ, 03058; тел: +38 (063) 108-22-01; e-mail: olchik01@ukr.net; <http://orcid.org/0000-0002-4161-782X>;

² Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Воздухофлотський, 31, Київ, 03037; тел: +38 (097) 217-68-79 ; e-mail: anatol.pikul@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0002-1516-8266>;

³ Національний авіаційний університет, проспект Космонавта Комарова, 1, Київ, 03058; тел: +38 (095) 286-39-90; e-mail: bmari.lira@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0003-2157-521X>.

Анотація. За останній час методи розрахунку будівель та споруд на міцність і жорсткість стрімко розвиваються в напрямку все більш повного врахування дійсних умов роботи конструкції. Дана робота присвячена дослідженню напружено деформованого стану бетонних і залізобетонних конструкцій при наявності вимушених деформацій з урахуванням повзучості. Вимушені деформації часто з'являються в молодому віці бетону, а їх післядія зберігається тривалий період часу. Основний зміст статті полягає в розгляді теорії розрахунку споруд на основі уявлення про конструкції як про ідеальні

пружно-пластичні системи. Крім того, наведені основні поняття про розрахунок пружно-в'язких систем, що характеризуються властивостями змінювати свій напружений стан з часом. У статті також розглянуто процес математичного моделювання повних деформацій залізобетонних конструкцій при експлуатації в умовах впливу високих температур, або з урахуванням впливу екзотермії при твердінні масивних бетонних конструкцій. Оскільки основні залежності між геометричними та фізичними величинами в теорії пружності та пластичності виводяться на елементах з диференційно малими розмірами і залежності між цими величинами поширюються з нескінченно малих елементів на всю розглянуту область, то в основі будь-яких досліджень напружено-деформованого стану конструкцій лежить метод фізичної дискретизації розглянутого об'єкту. Тому в даній статті велику увагу приділено процесу реалізації температурної функції повзучості в скінченно-елементному методі розрахунку будівель і споруд. Наведено результати верифікації розглянутої функції повзучості шляхом порівняння аналітичних рішень з експериментальними даними, отриманими при різних значеннях зміни температури навколишнього середовища випробовуваних зразків. Особливу увагу приділено теорії тепло- та вологopрoвідності бетону, інтенсивності яких залежить від температури, а також пружно-миттєвим властивостям тіл, які залежать від віку бетону. Отримані результати дослідження дозволяють більш точно аналізувати напружено-деформований стану конструкцій, який викликано зміною температури і вологості бетону з урахуванням повзучості.

Ключові слова: екзотермія, ентальпія, метод скінченних елементів, термічна дилатація, температурні напруження

SOLUTION OF THE CONCRETE THERMAL CREEP PROBLEM BY FINITE ELEMENT METHOD

BASHYNSKA O.¹, *Postgraduate*

PIKUL A.², *Assistant*

BARABASH M.³, *Professor*

¹ National Aviation University, 1, Kosmonavta Komarova avenue, 03058, Kiev, UKRAINE; phone: +38 (063) 108-22-01; e-mail: olchik01@ukr.net; <http://orcid.org/0000-0002-4161-782X>;

² Kyiv National University of Construction and Architecture, 31, Vozduhoflotskiy avenue, 03037, Kiev, UKRAINE; phone: +38 (097) 217-68-79 ; e-mail: anatol.pikul@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0002-1516-8266>;

³ National Aviation University, 1, Kosmonavta Komarova avenue, 03058, Kiev, UKRAINE; phone: +38 (095) 286-39-90; e-mail: bmari.lira@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0003-2157-521X>.

Abstract. Recently, the strength and stiffness analysis methods of buildings and structures have been rapidly developed in the direction of consideration the actual operating conditions of structures. The article is concerned with the studying of the stress-strain state of concrete and reinforced concrete structures taking into account constrained deformations and creep. Constrained deformations often appear at a young age of concrete, and their residual effect continue to exist for a long time. The main content of the article is based on the calculation theory what concerns structures as ideal systems with elastic and plastic characteristics. In addition, in the article the authors expound the basic calculation concepts of the elastic-plastic systems what provide property to change their stress state in time. The article also considers the mathematical modeling process of full deformations of reinforced concrete structures during operation under high-temperature conditions, or taking into account the effect of exothermy within hardening massive concrete structures. In this article much attention is paid to process of realizing the creep temperature function in the finite element method to calculate buildings and structures. The results of verification of the considered creep function are presented by comparing the analytical solutions with the experimental data obtained for different values of the ambient temperature of the test samples. Particular attention is paid to the theory of the thermal and moisture content of concrete, the intensity of which depends on temperature, as well as on the elastic-instantaneous properties of some objects that depend on the concrete age. The obtained results of the research make it possible to better analyze the stress-strain state of the structures, which is caused by temperature and humidity changes of concrete, taking into account creep.

Keywords: exotherm, enthalpy, finite elements method, thermal dilatation, thermal stresses

Постановка проблеми. Во время эксплуатации бетонные и железобетонные конструкции постоянно подвергаются воздействиям несилового характера, в результате которых происходит изменение напряженного состояния и возникают вынужденные деформации. К вынужденным деформациям относятся деформации, которые связаны с осадкой опор, искусственное перераспределение усилий, изменением температуры или влажности бетона и т.д. Без учёта влияния этих факторов на напряженно-деформированное состояние – невозможно надежно рассчитать ни одно здание или сооружение.

В результате нарушения термометрического равновесия конструкции с окружающей средой или при изменении энтальпии, в бетоне постоянно возникают температурные деформации. Такой вид деформаций неизбежен во многих массивных бетонных конструкциях, которые в молодом возрасте в следствии экзотермии разогреваются (часто их температура достигает 40 °С), а затем медленно остывают (рассеивание накопленного тепла может происходить в течении многих лет). Непрерывные температурные деформации свойственны сооружениям, что находятся на открытом воздухе и подвергаются атмосферным воздействиям, которые

носят периодический характер. Аналогичное влияние на конструкцию оказывают технологические циклы, например, в автоклавах, пропарочных камерах, горячих цехах и т.д. Длительному воздействию высоких температур подвергаются многие железобетонные сооружения специального назначения: дымовые трубы, фундаменты под специальные печи, бункеры для золы и шлака, боровы для отходящих газов и т.д.

Изучение напряженно деформированного состояния, которое вызвано вынужденными температурными деформациями, требует учета изменения во времени физико-механических свойств бетона, а также его ползучести.

Анализ последних источников и публикаций. Исследованию температурных напряжений в бетоне посвящены работы многих советских учёных: С.В. Александровского [1], Н.Х. Арутюняна [2], А.А. Гвоздева, Г.Н. Маслова, А.Р. Ржаницына и других. Много современных ученых занимаются развитием теории линейной и нелинейной ползучести: Л.Р. Маилья, Б. М. Языев, А. Г. Тамразян [4], Л. А. Аветисян и др. Большое количество зарубежных учёных посвящают свои работы вопросу термической ползучести: З. Базант [7, 8, 9, 10], Е. Осман, Л. Панула и многие другие. Также, написано большое количество работ о влиянии влажности бетона на скорость развития пластических деформаций конструкции, к ним относятся работы [7, 11, 13, 14, 16]. Много исследований и публикаций Американского Института Бетона (American Concrete Institute) посвящено методикам расчета конструкций с учетом термползучести, например, работы [5, 6].

О математических основах и связи метода конечных элементов с методами строительной механики (при решении нелинейных задач) изложено в работе [3] Городецкого А.С и Евзерова И.Д.

Нерешенные проблемы. При повышении температуры эксплуатации бетона, в нём начинают происходить определенные физико-механические изменения. Но несмотря на значительную актуальностью проблемы температурных напряжений и деформаций в конструкциях, существующие методы расчета не позволяют в достаточной степени учитывать изменение физико-механических характеристик бетона во времени. Поэтому уточнение и совершенствование существующих гипотез и методов расчета температурной ползучести является необходимым составляющим в процессе обеспечения надежного расчета и проектирования зданий и сооружений.

Цель и задача исследования. Появление температурных деформаций при ограничении перемещений конструкций влечет за собой развитие температурных напряжений, что часто сопровождается появлением температурных трещин. Последние влекут за собой значительные повреждения в статически неопределимых бетонных и железобетонных конструкциях.

Поэтому настоящая работа посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния бетонных и железобетонных конструкций при наличии вынужденных деформаций (возникших в результате появления только температурных напряжений). В работе также ставится цель ознакомить инженеров-проектировщиков и конструкторов с вопросом расчета бетонных или железобетонных сооружений за пределами упругости.

Основная часть. В процессе деформирования в теле накапливается энергия, которая обусловлена наличием внутренних сил. Но поскольку точки приложения внешних сил в процессе деформации перемещаются, то эти силы также осуществляют работу. С энергетической точки зрения процесс деформирования тела – это процесс обмена энергиями двух систем сил – внешних и внутренних. Полная потенциальная энергия деформированной системы может быть представлена в виде:

$$I(u) = \Pi(u) + W(u), \quad (1)$$

где $\Pi(u)$ – это потенциальная энергия деформации, а $W(u)$ – это работа внешних сил, что определяется в виде:

$$W(u) = \int_{\Omega} f \cdot u d\Omega, \quad (2)$$

где f – вектор внешних нагрузок; u – вектор перемещений.

Областью рассмотрения функционала $W(u)$ есть множество непрерывных функций u , что определены в области Ω n -мерного евклидова пространства.

Потенциальная энергия деформации выражается в виде равенства:

$$\Pi(u) = \frac{1}{2} \int_{\Omega} (DBu)(Bu) d\Omega = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \sigma(u) \varepsilon(u) d\Omega, \quad (3)$$

где D – матрица упругости, что определяет линейную связь между векторами напряжений и деформаций; B – матричный линейный дифференциальный оператор, что помогает отобразить вектор деформаций $\varepsilon(u)$ через вектор перемещений u .

Необходимым условием равновесия любой механической системы есть наличие экстремума функционала полной потенциальной энергии $I(u)$, поэтому основной задачей классического вариационного исчисления является нахождение экстремальных значений функционалов.

В соответствии с принципом Лагранжа, условием минимума функционала (1) является принцип возможных перемещений. Согласно этому принципу, в любой системе, которая находится в равновесии, сумма работ внешних сил и

соответствующих внутренних сил на любых возможных вариациях перемещений равна нулю:

$$a(u, v) + l(v) = 0, \tag{4}$$

где $l(v)$ – возможная работа внешних сил; $a(u, v)$ – возможная работа внутренних сил; v - вектор возможных перемещений.

Согласно идеи метода конечных элементов, для описания деформированного и напряженного состояния рассчитываемой системы – её дискретизируют. Это позволяет представить возможные работы внешних и внутренних сил в виде сумм по отдельным компонентам (конечным элементам). Тогда вектор неизвестных перемещений U аппроксимируют вектором узловых неизвестных q . Узловые неизвестные q являются искомым значением перемещений в узлах конечных элементов. На полученной дискретной модели вводится также система непрерывных функций $\varphi(x)$. Тогда вектор перемещений можно записать в виде:

$$u = q \cdot \varphi(x), \tag{5}$$

Если ввести обозначения:

$$k_{i,j} = \int_{\Omega} (B\varphi)^T DB \varphi d\Omega, \tag{6}$$

$$p_i = - \int_{\Omega} \varphi^T f d\Omega, \tag{7}$$

где $k_{i,j}$ – элементы матрицы жесткости системы $[K]$, а p_i – элементы вектора нагрузок $\{P\}$.

Тогда уравнение равновесия (4) для задач линейной теории упругости можно записать в матричном виде:

$$[K] \{q\} - \{P\} = 0, \tag{8}$$

В механике твёрдого тела сложные реологические явления, такие, как термоползучесть, заставляют отказаться от предположений линейной упругости.

В физически нелинейных задачах механические характеристики материалов, которые определяются матрицей упругости $[D]$ (зависящей от достигнутого уровня деформации тела), являются функциями компонентов перемещений:

$$[D] = [D(\{\varepsilon\})] = [D(\{q\})]. \tag{9}$$

Поскольку матрица упругости влияет на окончательный вид матрицы жесткости, то уравнение равновесия (8) принимает вид:

$$[K(\{q\})] \cdot \{q\} - \{P\} = 0, \tag{10}$$

Такое решение нелинейной задачи носит название метода переменных жесткостей. Для решения этого уравнения используют итерационный метод.

При решении задач ползучести итерационные методы применяются для каждого приращения времени.

Сначала предполагается, что $\{q\}_0 = 0$, вычисляется $K(\{q\}_0) = K_0$ и определяется $\{q\}_1 = [K_0]^{-1} \{P\}$. Процесс повторяется в соответствии с формулой:

$$\{q\}_n = [K]_{n-1}^{-1} \cdot \{P\}. \tag{11}$$

Вследствие свойств вязкоупругости в неоднородных стареющих телах полная удельная деформация в момент времени t будет состоять из суммы упругомгновенной деформации и деформации ползучести. Поэтому матрица упругости $[D] = [D(\{q\})]$ принимается зависимой от коэффициента ползучести $\phi(t, t')$, который отображает вязкоупругие свойства материала.

Тогда при решении задачи ползучести компоненты матрицы жесткости принимают вид:

$$k_{i,j} = \int_{\Omega} (B\varphi)^T D \{\phi(t, t')\} B \varphi d\Omega \tag{12}$$

Для решения нелинейного уравнения (10) используется метод касательной линеаризации (метод Ньютона-Рафсона):

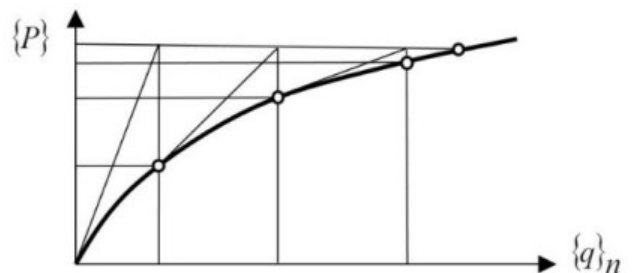


Рис.1. Метод Ньютона-Рафсона для решения нелинейных задач / The Newton-Raphson method to solve the nonlinear problems

Явление термической вязкоупругости характеризуется тем, что скорость деформации ползучести зависит не только от всей предыстории деформирования, но и от температуры. Поэтому при решении подобной задачи коэффициент ползучести $\phi(t, t')$ является функционалом, зависящим от функций времени, температуры и изменения некоторых химических характеристик бетона.

Наиболее приближенные результаты к эмпирическим данным для определения коэффициента ползучести, зависящего от температуры, позволяет получить двойной степенной закон:

$$\phi(t, t') = \phi_T f_W \left((t'e)^{-m} + \alpha \right) \cdot (t - t')^n. \tag{13}$$

Или, в сокращенном виде:

$$\phi(t, t') = \phi_T \cdot f_W \cdot f(t'e) \cdot (t-t')^n, \quad (14)$$

где ϕ_T – функция температуры; f_W – функция абсолютной влажности бетона; $t'e$ – функция гидратации бетона; α , m , n – некоторые параметры бетона, которые принимаются равными: $\alpha = 0.3$, $m = 1/3$, $n = 1/8$; t' – момент приложения загрузки; t – момент определения деформаций конструкции.

Известно, что при воздействии высоких температур значительное влияние на деформации усадки и ползучести оказывает изменение относительной влажности бетона. С увеличением температуры окружающей среды увеличивается скорость гидратации цемента. С уменьшением относительной влажности бетона падает и скорость гидратации. Когда относительная влажность достигает значения 0.3 – процесс гидратации практически останавливается и считается, что бетон пребывает в старом возрасте.

Большое количество зарубежных исследований посвящено развитию вопроса влияния скорости гидратации и относительной влажности бетона на величину деформаций ползучести. К ним относятся работы [7, 11, 13, 14, 16].

В результате внешних температурных воздействий, отсутствия термометрического равновесия с окружающей средой и экзотермии в бетоне возникают температурные поля. В таких условиях процесс диффузии тепла во влажном бетоне состоит не только из теплообмена, но и из массообмена фазовых превращений. В результате чего, тепловые потоки будут состоять из кондуктивного переноса тепла (за счет теплопроводности) и конвективного (перенос тепла движущейся жидкостью).

В работе [9] представлено оптимальную формулу для определения функции гидратации, которая максимально точно учитывает влияние кондуктивного и конвективного теплового потока в бетоне:

$$t'e = \int_0^{t'} \beta_T \beta_H dt, \quad (15)$$

где β_T – коэффициент корреляции температуры, β_H – коэффициент корреляции относительной влажности бетона.

Формула (15) отображает влияние относительной влажности бетона в момент приложения загрузки на скорость гидратации цемента.

$$\beta_T = \exp \left[\frac{U_h}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right], \quad (16)$$

где U_h – энергия активации гидратации, R – газовая постоянная.

$$\beta_H = \frac{1}{1 + (7.5 - 7.5H)^4}, \quad (17)$$

где H – относительная влажность бетона.

$$\phi_T = \phi_0 \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right], \quad (18)$$

где U – энергия увеличения скорости ползучести бетона.

В разных источниках представлены различные эмпирические величины изменения влажности бетона во времени.

Поэтому для реализации формулы (13) при определении степени гидратации бетона на момент приложения нагрузки, мы предлагаем универсальный график, который отображает изменения скорости гидратации и соответственно относительной влажности в зависимости от возраста бетона на момент приложения нагрузки.

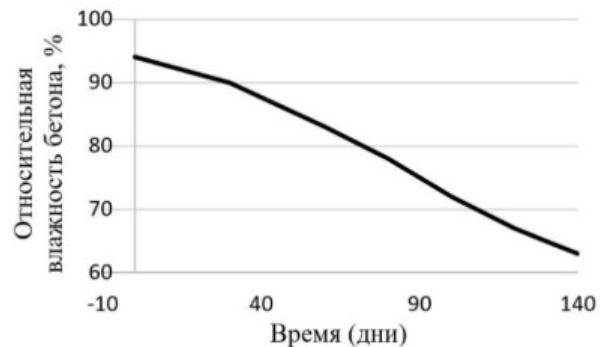


Рис. 2. Изменение относительной влажности бетона / The changing of concrete relative humidity

Этот график построен на основе корреляционного анализа эмпирических данных, взятых из [7, 11, 13, 14, 16].

Впервые двойной степенной закон для вычисления температурного коэффициента ползучести (13) был предложен чешским учёным – Зденеком Базантом в [8] и развит во многих последующих работах, в том числе работы [7, 9, 10]. Но эта зависимость подходит лишь для конструкций, которые эксплуатируются при неизменяемом значении высокой температуры.

В некоторых случаях актуальным есть определение деформаций ползучести конструкции с учётом изменения температуры эксплуатации, например, учёт влияния технологических циклов на производстве, периодическое изменение температуры окружающей среды или изменение энтальпии массивных бетонных конструкций.

Для решения такой задачи предположим, что функция температуры ϕ_T изменяется во времени и отображается в виде кусочно-линейной зависимости,

тогда обозначим её через $\phi_T(t)$. Далее представим коэффициент ползучести в виде следующего функционала:

$$\Phi(T, t, t') = \phi_T(t) f_W f(t'_e) (t - t')^n, \quad (19)$$

Найдем вариацию функционала $\Phi(T, t, t')$ в некоторой точке $t = \tau$ и представим его в виде степенного функционального ряда на некотором интервале, содержащем в себе точку τ :

$$\Phi(T, t, t') = \sum_{t=t'} \phi_T(t) f_W f(t'_e) \left(f^n(t) \right)'_t \Delta t, \quad (20)$$

где τ – возраст бетона в момент определения деформаций ползучести.

Для упрощения записи введем параметр $H(t') = f_w \cdot f(t'_e)$, который будет отображать изменение физических характеристик бетона в зависимости от момента приложения нагрузки t' .

Продифференцируем функцию $f^n(t)$ и запишем уравнение (19) в виде:

$$\Phi(T, t, t') = \sum_{t=t'} \phi_T(t) H(t') n \left(f^{(n-1)}(t) \right) \Delta t. \quad (21)$$

Используя данное выражение можно вычислить функцию ползучести в любой момент времени, учитывая историю изменения температуры эксплуатации конструкции (или для определения последствий экзотермии).

Для верификации выведенной формулы проведем сравнение коэффициентов ползучести, вычисленных аналитическим путём по формуле (20) со значениями коэффициентов ползучести, полученных экспериментальным путём.

Экспериментальные данные были взяты из [1]. Объектом исследования служил призматический брус, жестко заделанный по торцам, с заданным температурным режимом. Таким образом, искусственно создавались условия одномерной температурной задачи.

При проведении эксперимента исследовались бетонные блоки с размерами 25x25x140 см. Каждый блок равномерно разогревался до заданной температуры без ограничений деформаций. В таблице 1 показано изменение температурного режима при проведении испытания.

Заданный температурный режим создавался специальной нагревательной системой с насосом, в которой во время опыта находился блок.

Прочность бетона была равной: 390, 460, 400 кГ/см² для блоков №1, 2 и 3 соответственно.

Таблица 1

Температурный режим испытываемых бетонных блоков / The temperature conditions of the concrete test specimens

№ блока	Возраст к началу разогрева в сутках	Разогрев			Остывание	
		Продолжительность в часах	ΔT в градусах	T_{max} в градусах	Продолжительность в часах	T_{max} в градусах
1	19	49	37,8	57,4	166	34,3
2	21	67,5	42,5	60,5	336	41,8
3	36	48	40	59	204	38

Расчётные значения модулей деформации блоков равны: для блока № 1 $E = 0.35 \cdot 10^5$ МПа, для блока № 2 $E = 0.375 \cdot 10^5$ МПа, для блока № 3 $E = 0.347 \cdot 10^5$ МПа.

На рисунке 3 приведено сравнение эмпирических и аналитических значений коэффициентов ползучести при изменении температуры окружающей среды бетонных образцов.

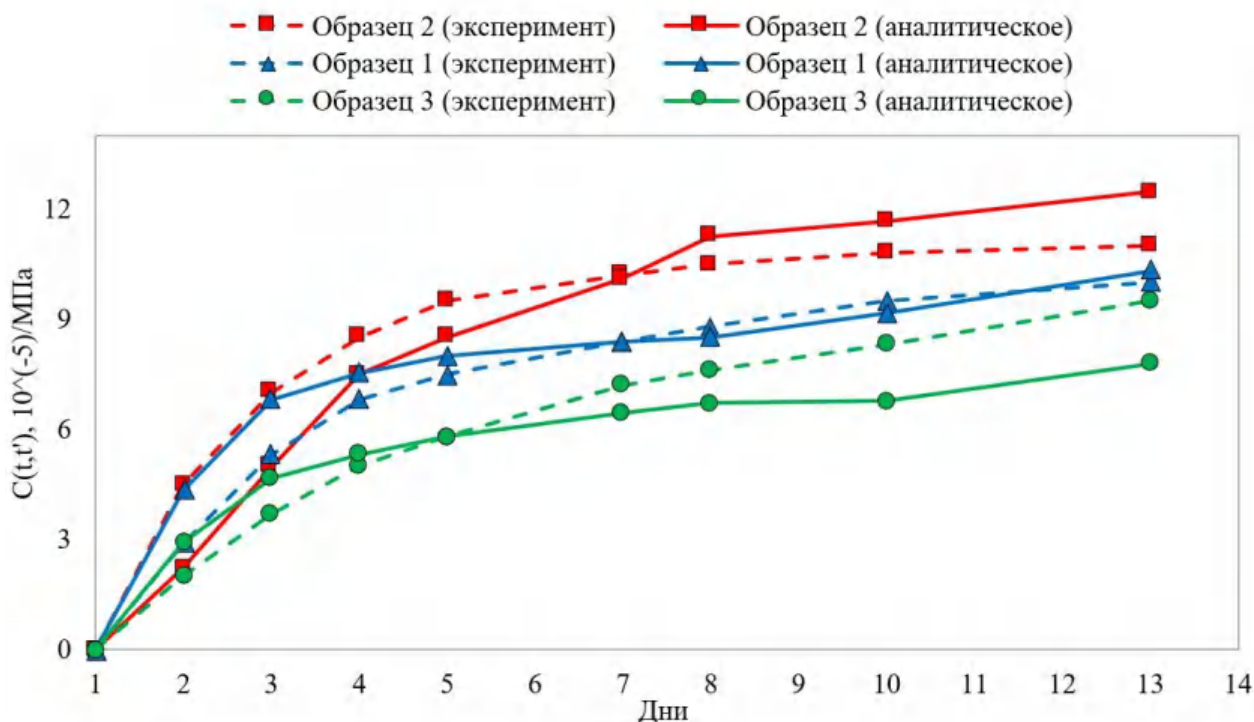


Рис. 3. Сравнение аналитических коэффициентов ползучести с эмпирическими данными / Comparison of analytical creep coefficients with empirical data

Выводы. В обычных условиях работы бетонные и железобетонные конструкции постоянно подвергаются воздействию изменения температуры и влажности, что вызывает в них температурные деформации. Скорость деформации ползучести существенно зависит от температуры среды, особенно в моменты приложения нагрузки на тело.

Предложенная в статье формула (13) позволяет рассчитать полные деформации конструкции (с учетом деформаций ползучести) и которая также дает возможность учитывать историю изменения температуры окружающей среды конструкции.

Приведенная формула учитывает влияние на деформации ползучести таких факторов, как

скорость гидратации цемента, изменения относительной влажности, а также изменение тепловых потоков в бетоне в зависимости от температуры окружающей среды.

Показан процесс реализации расчета деформаций термползучести конструкции в методе конечных элементов.

По результатам сравнения эмпирических и аналитических данных, что показаны на рисунке 3, можно утверждать, что предложенная в данной статье функция ползучести подходит для определения полных деформаций при эксплуатации конструкции в условиях воздействия повышенных температур или при изменении температурного режима эксплуатации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на температурные и влажностные воздействия (с учетом ползучести) / Александровский С.В. – М. : Стройиздат, 1966. – 443 с.
2. Арутюнян Н.Х. Некоторые вопросы теории ползучести / Арутюнян Н.Х. – М. : Гостехтеориздат, 1952. – 323 с.1
3. Городецкий А. С. Компьютерные модели конструкций / А. С. Городецкий, И.Д. Евзеров. – М. : Изд-во АСВ, 2009. – 360 с.1
4. Тамразян А. Г. Механика ползучести бетона: монография / А. Г. Тамразян, С.Г. Есяян. – Москва : МГСУ, 2012. – 490 с.
5. ACI Manual of Concrete Practice: Part 1 – 1980. – U.S.A., American Concrete Institute, 1980. – 453 p. – (Manual).
6. Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete: ACI 209.2R-08. – U.S.A., American Concrete Institute, 2008. – 48 p. – (Guide for modeling and calculating).
7. Bazant Z. P. Concrete creep at variable humidity: constitutive law and mechanism / Z. P. Bazant, J. C. Chern // *Materiaux et constructions*. – Vol. 18, № 103 – 1985. – P. 1 – 20.
8. Bazant Z. P. Mathematical model for creep and thermal shrinkage of concrete at high temperature / Z. P. Bazant // *Nuclear engineering and Design*. – 1982. – P. 183 – 191.
9. Bazant Z. P. Mathematical Modeling of Creep and Shrinkage of Concrete / Z. P. Bazant // John Wiley & Sons Ltd. Chapter 2. – *Material Models for Structural Analysis*. – 1988. – P. 98 – 215.

10. Bazant Z. P. Temperature effect on Concrete Creep Modeled by Microprestress-Solidification Theory / Zdenek Bazant, Gianluca Cusatis, Luigi Cedolin // Journal of engineering mechanics. – 2004. – P. 691 – 699.
11. Granja J. L. Hygrometric Assessment of internal Relative Humidity in Concrete: Practical Application issues / Jose Luis Granja, Miguel Azenha, Christoph de Sousa, Rui Faria, Joaquim Barros // Journal of Advanced Concrete Technology. – Vol. 12. – 2014. – P. 250– 265.
12. Naus D. J. The effect of elevated temperature on concrete materials and structures – a literature review / D. J. Naus. – Oak Ridge National Laboratory, 2008. – 186 p.
13. Jensen V. Relative Humidity Measured by Wooden Stick Method in Concrete Structures: Long Term Measurements and Reduction of Humidity by Surface Treatment / Viggo Jensen // 6th Int. Conf. on Durability of Concrete, ACI/Canmet. – Thessaloniki, Greece 2003.
14. Rust C. K. Role of Relative Humidity in Concrete Expansion due to Alkali-Silica Reaction and Delayed Ettringite Formation: Relative Humidity Thresholds, Measurement Methods, and Coatings to Mitigate Expansion: Thesis for the Degree of Master of Science in Engineering : May 2009 / Charles Karissa Rust – Texas, 2009. – 106 p.
15. Willam K. Thermal response of reinforced concrete structures in nuclear power plants / Kaspar Willam, Yunping Xi, Keun Lee, Byunhun Kim. – College of engineering and applied science, 2009. – 210 p.
16. Zhou J. Internal relative humidity distribution in concrete considering self-desiccation at early ages / Jikai Zhou, Xudong Chen, Jilan Zhang, Yan Wang // International Journal of the Physical Sciences. – Vol. 6(7). – 2011. – P. 1604-1610.

REFERENCES

1. Aleksandrovsky S.V. *Raschet betonnyh i zhelezobetonnyh konstrukcij na temperaturnyje i vlazhnostnyje vozdejstviya (s uchetom polzuchesti)* [Calculation of concrete and reinforced concrete structures for temperature and humidity effects (taking into account creep)] / Aleksandrovsky S.V. – Moscow : Strojizdat, 1966. – 443 p. (in Russian).
2. Harutyunyan N.H. *Nekotoryje voprosy teorii polzuchesti* [Some questions of the theory of creep] / Harutyunyan N.H. – Moscow : Gosttehorizdat, 1952. – 323 p. (in Russian).
3. Gorodetsky A.S. *Komp'juternye modeli konstrukcij* [Computer construction models] / A. S. Gorodetsky, I.D. Yevzerov. – Moscow : Изд-во АСВ, 2009. –360 p. (in Russian).
4. Tamrazyan A.G. *Mehanika polzuchesti betona: monografija* [Mechanics of creep of concrete: monograph] / A.G. Tamrazyan, S.G. Yesayan. – Moscow : MGSU, 2012. – 490 p. (in Ukrainian).
5. ACI Manual of Concrete Practice: Part 1 – 1980. – U.S.A., American Concrete Institute, 1980. – 453 p. – (Manual).
6. *Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete: ACI 209.2R-08.* – U.S.A., American Concrete Institute, 2008. – 48 p. – (Guide for modeling and calculating).
7. Bazant Z. P. *Concrete creep at variable humidity: constitutive law and mechanism* / Z. P. Bazant, J. C. Chern // Materiaux et constructions. – Vol. 18, № 103 – 1985. – pp. 1 – 20.
8. Bazant Z. P. *Mathematical model for creep and thermal shrinkage of concrete at high temperature* / Z. P. Bazant // Nuclear engineering and Design. – 1982. – pp. 183 – 191.
9. Bazant Z. P. *Mathematical Modeling of Creep and Shrinkage of Concrete* / Z. P. Bazant // John Wiley & Sons Ltd. Chapter 2. – Material Models for Structural Analysis. – 1988. – pp. 98 – 215.
10. Bazant Z. P. *Temperature effect on Concrete Creep Modeled by Microprestress-Solidification Theory* / Zdenek Bazant, Gianluca Cusatis, Luigi Cedolin // Journal of engineering mechanics. – 2004. – pp. 691 – 699.
11. Granja J. L. *Hygrometric Assessment of internal Relative Humidity in Concrete: Practical Application issues* / Jose Luis Granja, Miguel Azenha, Christoph de Sousa, Rui Faria, Joaquim Barros // Journal of Advanced Concrete Technology. – Vol. 12. – 2014. – pp. 250– 265.
12. Naus D. J. *The effect of elevated temperature on concrete materials and structures – a literature review* / D. J. Naus. – Oak Ridge National Laboratory, 2008. – 186 p.
13. Jensen V. *Relative Humidity Measured by Wooden Stick Method in Concrete Structures: Long Term Measurements and Reduction of Humidity by Surface Treatment* / Viggo Jensen // 6th Int. Conf. on Durability of Concrete, ACI/Canmet. – Thessaloniki, Greece 2003.
14. Rust C. K. *Role of Relative Humidity in Concrete Expansion due to Alkali-Silica Reaction and Delayed Ettringite Formation: Relative Humidity Thresholds, Measurement Methods, and Coatings to Mitigate Expansion: Thesis for the Degree of Master of Science in Engineering* : May 2009 / Charles Karissa Rust – Texas, 2009. – 106 p.
15. Willam K. *Thermal response of reinforced concrete structures in nuclear power plants* / Kaspar Willam, Yunping Xi, Keun Lee, Byunhun Kim. – College of engineering and applied science, 2009. – 210 p.
16. Zhou J. *Internal relative humidity distribution in concrete considering self-desiccation at early ages* / Jikai Zhou, Xudong Chen, Jilan Zhang, Yan Wang // International Journal of the Physical Sciences. – Vol. 6(7). – 2011. – pp. 1604-1610.

Стаття поступила до редколегії 21.04.2017