

4. Архітектурне проектування будівель і споруд тимчасового колективного проживання: навч. посібник для студ. спец. 7.06010201 «Архітектура будівель і споруд» / В.З. Ткаленко; Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури. – К.: КНУБА, 2012.

5. Армия спасения: Архитекторы против войны и стихийных бедствий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://archspeech.com/article/armiya-spaseniya-arhitektory-protiv-voyny-i-stihiynyh-bedstviy>.

Аннотация

Приведены результаты исследования различных видов модульных строительных конструкций, применяемых при проектировании временного жилья для аварийных ситуаций и закономерности его проектирования.

Ключевые слова: мобильные конструкции, временное жилье, мобильное жилье, сборные конструкции.

Abstract

The results of researching different types of modular building structures used in the design of temporary housing for emergency situations and patterns of its design are presented.

Keywords: mobile structures, temporary housing, mobile home, modular design.

Стаття надійшла до редакції у березні 2017р.

УДК 624.044.3

Башинская О.Ю.⁵, аспирантка

Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ БЕТОНА С УЧЁТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ЭКСПЛУАТАЦИИ

В статье рассмотрен процесс математического моделирования полных деформаций железобетонных конструкции при эксплуатации в условиях воздействия высоких температур, а также с учетом влияния

⁵ © Башинская О.Ю.

экзотермии при твердении массивных бетонных конструкций. Впервые предложена формула для вычисления функции ползучести, которая учитывает изменение температуры эксплуатации конструкции. Разработана универсальная методика для численного расчета пластических деформаций железобетонных конструкций при воздействии высоких температур или изменении напряжений в результате термической дилатации. Приведены результаты верификации предложенной функции ползучести путём сравнения аналитических решений с экспериментальными данными, полученными при различных значениях температуры окружающей среды испытываемых образцов.

Ключевые слова: экзотермия, энтальпия, термическая дилатация, температурные напряжения

Постановка проблемы. В результате нарушения термометрического равновесия конструкции с окружающей средой или при изменении энтальпии, бетон претерпевает 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. Аналогическое 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 предназначения: дымовые трубы, фундаменты под специальные печи, бункеры для золы и шлака, боровы для отходящих газов и т.д.

Цель и задача исследования. 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 конструкции невозможно надежно рассчитать бетонные или железобетонные конструкции, гражданские, гидротехнические или промышленные сооружения.

Настоящая работа посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния бетонных и железобетонных конструкций при наличии вынужденных деформаций (возникших в результате появления только температурных напряжений).

Анализ последних источников и публикаций.

Исследованию температурных напряжений в бетоне посвящены работы многих советских учёных: С.В. Александровского [1, 2], Н.Х.Арутюняна [3], А.А.Гвоздева, Г.Н.Маслова, А.Р.Ржаницына и других. Много современных исследователей посвящают свои работы развитию теории линейной и нелинейной ползучести: Л.Р.Маилян, Б. М.Языев, А. Г.Тамразян [5], Л. А.Аветисян и др. Развитием вопроса термической ползучести занимаются большое количество зарубежных учёных: З. Базант [9, 10, 11, 12], Е. Осман, Л. Панула [11]. Много исследований и публикаций Американского Института Бетона (American Concrete Institute) посвящено методикам расчета конструкций с учетом термползучести, например, работы [6, 7].

Нерешенные проблемы. В связи с актуальностью проблемы температурных напряжений и деформаций в конструкциях, необходимым является уточнение и совершенствование существующих методов расчета, которые в достаточной мере не могут учитывать изменение во времени физико-механических характеристик бетона.

В обычных условиях работы бетонных и железобетонных конструкций, бетон постоянно поддается воздействию изменения температуры и влажности, что вызывает в нём температурные деформации. Вследствие неравномерного распределения температурных деформаций по объему тела, а также из-за ограничения деформаций внешними связями, их появление сопровождается развитием напряжений. Поэтому исследование

особенностей температурных деформаций бетона имеет значительное практическое значение.

Основная часть. Известно, что полные деформации бетонной или железобетонной конструкции $\varepsilon_x^*(t)$ состоят из мгновенных (упругих) и пластических деформаций.

Следовательно, полные деформации в бетоне можно описать с помощью интегрального уравнения Вольтерры, решение которого (в одномерном случае) записывается в виде:

$$\frac{\sigma_x^*(t)}{E(t)} = \frac{\sigma_x(t)}{E(t)} - \int_{\tau_1}^t \frac{\sigma_x(\tau)}{E(\tau)} R(t, \tau) d\tau; \quad (1)$$

где $R(t, \tau)$ – наследственная функция бетона второго рода, представляющая меру релаксации материала. Если учесть появление вынужденных деформаций (в данной работе рассматриваются только температурные вынужденные деформации), то поле изменений соответствующих характеристик состояния материала отыскивается в виде произведения:

$$\varepsilon^0(t) = \varepsilon_0 T(t) F(x, y, z), \quad (2)$$

В соответствии с этим, решение упруго-мгновенной задачи можно записать в виде

$$\sigma_x(t) = \alpha \varepsilon_0 T(t) E(t) F_x(x, y, z). \quad (3)$$

А полное напряжение в теле можно выразить в следующем виде:

$$\sigma_x^*(t) = \sigma_x(t) H^*(t, \tau), \quad (4)$$

где $H^*(t, \tau)$ – коэффициент приведения упругих напряжений к искомым полным напряжениям, отыскиваемым с учетом ползучести [1].

Проблеми розвитку міського середовища. Вип.1(17) 2017

В европейских и американских источниках коэффициент $H^*(t, \tau)$ заменяют на некую функцию ползучести $J(t, t')$. И в случае рассмотрения линейной зависимости между напряжениями и деформациями ползучести, опираясь на принцип суперпозиции, полные деформации конструкции выражают в виде:

$$\varepsilon(t) = \int_0^t J(t, t') d\sigma(t') + \varepsilon^0(t), \quad (5)$$

Это уравнение отображает взаимосвязь между характеристиками прочности и пластичности бетона, как стареющего упруго-пластического материала. Где $J(t, t')$ – функция податливости материала (функция ползучести). Эта функция отображает полные деформации тела в момент времени t , которые спровоцированы единичным напряжением, что действовало с момента времени t' :

$$J(t, t') = \frac{1}{E(t')} + C(t, t') = \frac{1 + \phi(t, t')}{E(t')}, \quad (6)$$

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.

При повышении температуры эксплуатации бетона, в нём начинают происходить определенные физико-механические изменения.

Для аппроксимации функции ползучести наиболее приближенные результаты к эмпирическим данным позволяет получить двойной степенной закон:

$$\begin{aligned}
 J(T, t, t') &= \frac{1}{E_0} + \frac{\phi_T \cdot f_W}{E_0} \cdot \left(e^{-\alpha t^m} + \alpha \right) \cdot \left(-t' \right)^n = \\
 &= \frac{1}{E_0} + \frac{\phi_T \cdot f_W}{E_0} \cdot f \left(e^{-\alpha t^m} \right) \cdot \left(-t' \right)^n
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Где ϕ_T – функция температуры, f_W – функция абсолютной влажности бетона, t'_e – функция периода гидратации бетона, α, m, n – параметры бетона, которые равны: $\alpha = 0.3$, $m = 1/3$, $n = 1/8$, E_0 – модуль мгновенной деформации бетона.

Впервые эта формула была предложена чешским учёным – Зденеком Базантом в [10] и развита во многих последующих работах, в том числе работы [9, 11, 12]. Но эта зависимость подходит лишь для конструкций, которые эксплуатируются при неизменяемом значении высокой температуры.

Но 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 ϕ_T . Далее представим функцию ползучести в виде:

$$J(T, t, t') = \frac{1}{E_0} + \frac{\Phi(T, t, t')}{E_0},
 \tag{8}$$

где $\Phi(T, t, t') = \phi_T \cdot f_W \cdot f \left(e^{-\alpha t^m} \right) \cdot \left(-t' \right)^n$ – это некоторая безразмерная функция, которая зависит от времени и температуры эксплуатации.

Проблеми розвитку міського середовища. Вип.1(17) 2017

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

$$\Phi(T, t, t') = \sum_{t=t'}^{\tau} \phi_T \left(f_W \cdot f_e \right)' \left(f^n \right)'_t \cdot \Delta t, \quad (9)$$

где τ – возраст бетона в момент определения деформаций ползучести.

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

Продифференцируем функцию $f^n \left(\right)$ и запишем уравнение (9) в виде:

$$\Phi(T, t, t') = \sum_{t=t'}^{\tau} \phi_T \left(H \right)' \cdot n \cdot \left(f^{(n-1)} \right)' \cdot \Delta t. \quad (10)$$

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 функции ползучести, вычисленной аналитическим путём по формулам (8) (с учётом интегрирования продифференцированной функции $f^n \left(\right)$ во времени) со значениями функции ползучести, полученными экспериментальным путём.

На сегодняшний день большинство приведенных эмпирические значений функций ползучести получены при воздействии только постоянно высоких (или повышенных) температур, результаты влияния изменения температуры эксплуатации конструкции во времени приведены лишь для очень малого промежутка времени. Поэтому для сравнения аналитических

и эмпирических данных зададим функцию температуры в виде прямой:

$$\phi_T \ominus T = const . \quad (11)$$

Сравнение полученных аналитических решений с экспериментальными данными показаны на рисунках 1 и 2.

Опытные значения функций ползучести взяты из [11] (для графиков на рисунке 1) и из [14] (для графиков на рисунке 2). Параметры материала были заданы следующими:

- для графиков на рисунке 1:

$$\frac{1}{E_0} = 0,668 \cdot 10^{-9} \text{ МПа (в оригинале } \frac{1}{E_0} = 0.097 \cdot 10^{-6} \text{ psi) ;}$$

– для графиков на рисунке 2:

$$\frac{1}{E_0} = 0,71 \cdot 10^{-9} \text{ МПа (в оригинале } \frac{1}{E_0} = 0.103 \cdot 10^{-6} \text{ psi).}$$

На рисунках непрерывными линиями показаны результаты аналитических решений, в точечном виде приведены экспериментальные данные.

Выводы. Изучение напряженно-деформированного состояния, которое вызвано вынужденными деформациями, требует учета изменения во времени физико-механических свойств бетона и явления ползучести. Особенностью вынужденных деформаций есть то, что вызываемые ими напряжения, независимо от их величины, в результате проявления ползучести, обычно значительно увеличиваются во времени, даже в области линейной ползучести, в то время, как напряжения, вызванные действием внешней нагрузки в этой области практически не изменяются и действие ползучести сказывается лишь на перемещениях конструкции.

По результатам сравнения данных, полученных аналитическим путем с экспериментальными данными можно утверждать, предложенная в этой статье функция ползучести подходит для определения полных деформаций конструкции при эксплуатации в условиях воздействия повышенных и высоких температур.

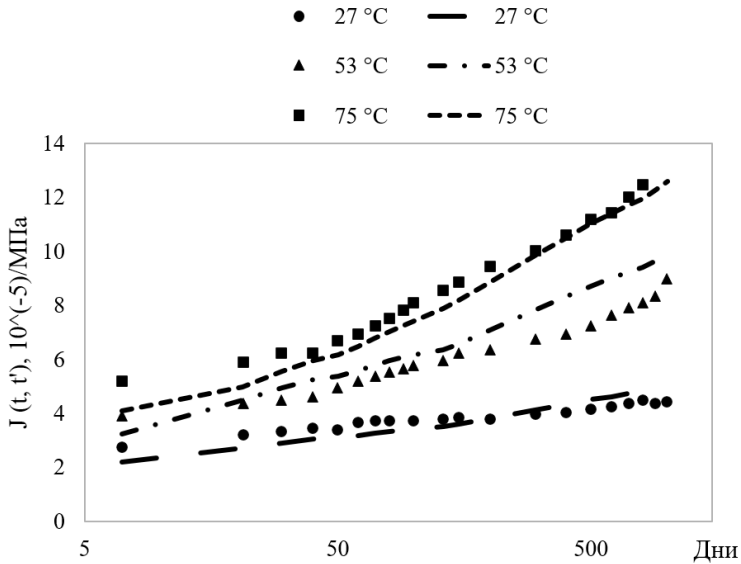


Рис. 1. Сравнение экспериментальных и аналитических значений функции ползучести с учетом воздействия высокой температуры

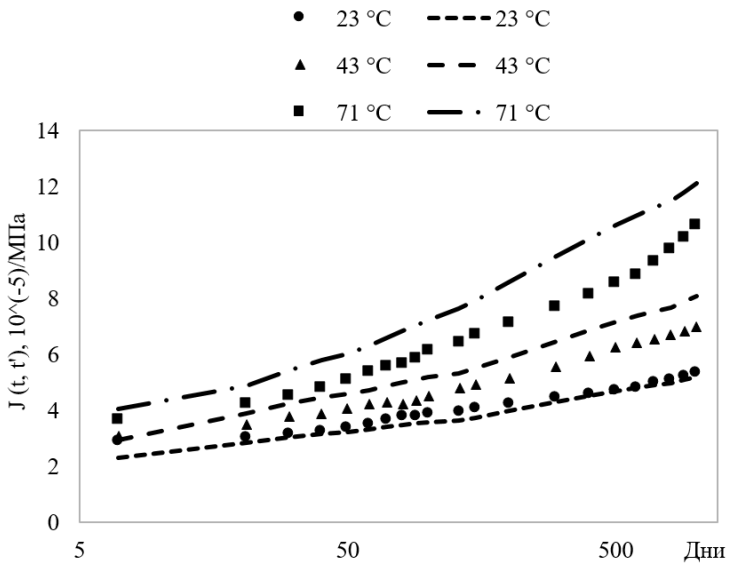


Рис. 2. Сравнение экспериментальных и аналитических значений функции ползучести с учетом воздействия высокой температуры

Список використаних джерел:

1. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменение температуры и влажности с учётом ползучести / Александровский С. В. – М.: Стройиздат, 1973. – 432 с.
2. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на температурные и влажностные воздействия (с учетом ползучести) ползучести / Александровский С.В. – М.: Стройиздат, 1966. – 443 с.
3. Арутюнян Н.Х. Некоторые вопросы теории ползучести / Арутюнян Н.Х. – М. : Гостехтеориздат, 1952. – 323 с.
4. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций / Работнов Ю. Н. – М. : Изд-во «Наука», 1966 – 752 с.
5. Тамразян А. Г. Механика ползучести бетона: монография / А.Г. Тамразян, С.Г.Есян. – Москва : МГСУ, 2012. – 490 с.
6. ACI Manual of Concrete Practice: Part 1 – 1980. – U.S.A., American Concrete Institute, 1980. – 453 p. – (Manual).
7. 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).
8. Barani O. R. Concrete basic creep prediction based on time-temperature equivalence relation and short-time tests / O. R. Barani, D. Mostofinejaad, M.M. Saadatpour, M. Shekarchi // The Arabian Journal for Science and Engineering. – Vol. 35, № 2B. – 2010. – P. 105 – 121.
9. Bazant Z. P. Creep and Shrinkage in Concrete Structures / Z. P. Bazant, F. H. Wittmann. – Wiley, Chichester, 1982. – 363 p.
10. 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.
11. Bazant Z. P. Practical prediction of time-dependent deformations of concrete / Z. P. Bazant, L. Panula // Materiaux et constructions. – Vol. 11, № 66 – 1978 – P. 425 – 434.
12. 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.

13. 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.

14. Havlasek P. Modeling of Concrete Creep Based on Microprestressing-solidification Theory / P. Havlasek, M. Jirasek // Acta Polytechnica. – 2012. – Vol. 52. – P. 34 – 42.

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.

Анотація

У статті розглянуто процес математичного моделювання повних деформацій залізобетонних конструкцій при експлуатації в умовах високих температур, а також з урахуванням впливу екзотермії бетону при твердінні масивних конструкцій. Вперше запропонована формула для обчислення функції повзучості, яка враховує зміну температури експлуатації конструкції. Розроблено універсальну методіку для чисельного розрахунку пластичних деформацій залізобетонних споруд при впливі високих температур або зміні напружень в результаті термічної дилатації. Наведено результати верифікації запропонованої функції повзучості шляхом порівняння аналітичних рішень з експериментальними даними, отриманими при різних значеннях температури навколишнього середовища випробовуваних зразків.

Ключові слова: екзотермія, ентальпія, термічна дилатація, температурні напруження.

Annotation

The article describes the mathematical modeling process of complete deformation of concrete constructions during exploitation at high temperatures, as well as the impact of concrete exotherm during the hardening of massive structures. For the first time a formula for calculating the creep function proposed, which takes into account the changes of the exploitation temperature. The author elaborated the universal method for the numerical calculation of the plastic deformation of reinforced concrete structures under high temperature or stress changes due to thermal dilatation. Results of the verification of the proposed creep function by comparing analytical solutions with the experimental data obtained for different values of the ambient temperature for the test specimens.

Keywords: exotherm, enthalpy, thermal dilation, temperature stresses

Стаття надійшла до редакції у березні 2017р.