

УДК 624.044.3

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА
ЭКСПЛУАТАЦИИ В ПК «ЛИРА-САПР»**

Башинская О.Ю., аспирант, ассистент,
Барабаш М.С., д.т.н., профессор,
Национальный авиационный университет
bmari.lira@gmail.com

Пикуль А.В., ассистент,
Киевский национальный университет строительства и архитектуры
anatol.pikul@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния бетонных и железобетонных конструкций при наличии вынужденных деформаций с учетом термоползучести. Приведены основные уравнения для нахождения термической функции ползучести, а также алгоритм реализации вычисления температурных деформаций ползучести при помощи метода конечных элементов. Рассмотрен процесс построения компьютерной модели конструкции и анализ напряженно-деформированного состояния при изменении температурного режима эксплуатации. Проведен анализ кинематических и статических характеристик рассматриваемой расчетной модели.

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

**ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЦИКЛІЧНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ
ЕКСПЛУАТАЦІЇ В ПК «ЛІРА-САПР»**

Башинська О.Ю., аспірант, асистент,
Барабаш М.С., д.т.н., професор,
Національний авіаційний університет
bmari.lira@gmail.com

Пікуль А.В., асистент,
Київський національний університет будівництва і архітектури
anatol.pikul@gmail.com

Анотація. Стаття присвячена дослідженню напружено-деформованого стану бетонних та залізобетонних конструкцій при наявності вимушених деформацій з урахуванням термоповзучості. Наведено основні рівняння для знаходження термічної функції повзучості, а також алгоритм реалізації обчислення температурних деформацій повзучості за допомогою методу скінченних елементів. Розглянуто процес побудови комп'ютерної моделі конструкції та аналіз її напружено-деформованого стану при зміні температурного режиму експлуатації. Проведено аналіз кінематичних і статичних характеристик розглянутої розрахункової моделі.

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

NUMERICAL MODELING OF CYCLIC TEMPERATURE OPERATING CONDITION ON SP «LIRA-SAPR»

Bashynska O., postgraduate student,
Barabash M., Doctor of Engineering, Professor,
National Aviation University
bmari.lira@gmail.com

Pikul A., Assistant,
Kyiv National University of Construction and Architecture
anatol.pikul@gmail.com

Abstract. The study of the stress-strain state caused by forced temperature deformations requires to take into account the changes of the physical and mechanical properties of concrete in time, as well as its creep. There are two types of heating structures: cyclic and stationary. The software packages such as Ansys, LIRA-SAPR, Code Aster make possible to take into account both types of operating conditions of buildings when modeling or the analysis of the strength and stiffness properties. The article is devoted to the investigation of the stress-strain state of concrete and reinforced concrete structures taking into account forced deformations and thermal creep. The basic equations to find the thermal creep function are presented, as well as an algorithm to realize the calculation of temperature creep strains by the finite element method. The article also considers the process of creation of a structure computer model and analysis of its stress-strain state with a change of the temperature operating condition. The analysis of the kinematic and static characteristics of the calculated model is carried out.

Keywords: thermal creep, finite element method, exotherm, thermal dilatation, temperature stresses.

Введение. В некоторых случаях во время эксплуатации строительные конструкции подвергаются систематическому воздействию повышенных и высоких климатических или технологических температур. К ним относятся конструкции «горячих» цехов с повышенными температурами от 50 до 200°C, конструкции автоклавов и пропарочных камер, элементы конструкций тепловых агрегатов подвергаются воздействию температур выше 200°C. 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. К аналогичным условиям эксплуатации относятся конструкции зданий, которые расположены в районах с сухим и жарким климатом, в таком случае конструкции подвергаются циклическому воздействию солнечной радиации, которая в дневное время достигает 50 °C и выше.

Изучение напряженно деформированного состояния, которое вызвано вынужденными температурными деформациями, требует учета изменения во времени физико-механических свойств бетона, а также его ползучести. Различают два вида нагрева конструкций: циклический и стационарный. Учитывать оба вида условий эксплуатации зданий при моделировании и расчете прочностных и жесткостных характеристик позволяют такие программные комплексы, как Ansys, «ЛИРА-САПР», Code Aster.

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. О математических основах метода конечных элементов при решении линейных и нелинейных задач строительной механики изложено в работе А.С. Городецкого [3]. Много современных ученых занимаются развитием теории линейной и нелинейной ползучести: Л.Р. Маилян, Б.М. Языев, А.Г. Тамразян [4], Л.А. Аветисян и др. Большое количество зарубежных учёных посвящают свои работы вопросу термической ползучести: З. Базант [5-8], Е. Осман,

Л. Панула и многие другие. Много исследований и публикаций Американского Института Бетона (American Concrete Institute) посвящено методикам расчета конструкций с учетом термползучести, например, работы [9, 10].

Цель и задача исследования. Целью работы является численное моделирование изменения температурного режима эксплуатации зданий и сооружений, исследование прочностных и деформативных характеристик железобетонных элементов конструкции, а также анализ влияния термползучести бетона на напряженно-деформированное состояние строительных объектов.

Объекты и методы исследования. Объектом исследования являются железобетонные элементы конструкции. Исследование базируется на современных методах теории упругости и пластичности, а также теории ползучести. Используется численное моделирование работы конструкции при помощи метода конечных элементов в ПК «ЛИРА-САПР».

Результаты исследования. В матричном виде уравнение равновесия для задач линейной теории упругости записывают:

$$[K]\{q\} - \{P\} = 0, \quad (1)$$

где $[K]$ – матрица жесткости системы, $\{P\}$ – вектор нагрузок, $\{q\}$ – вектор узловых неизвестных.

В механике твёрдого тела сложные реологические явления, такие, как термползучесть, заставляют отказаться от предположений линейной теории упругости. В физически нелинейных задачах механические характеристики материалов, которые определяются матрицей упругости $[D]$ (зависящей от достигнутого уровня деформации тела), являются функциями компонентов перемещений:

$$[D] = [D(\{\varepsilon\})] = [D(\{q\})]. \quad (2)$$

Поскольку матрица упругости влияет на окончательный вид матрицы жесткости, то уравнение равновесия (1) принимает вид:

$$[K(\{q\})] \cdot \{q\} - \{P\} = 0, \quad (3)$$

Для решения этого уравнения используют итерационный метод [3]. 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:

$$\{q\}_n = [K]_{n-1}^{-1} \cdot \{P\}. \quad (4)$$

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.

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 $\phi(t, t')$ зависит от времени, изменения некоторых характеристик бетона и температуры.

Наиболее приближенные результаты к эмпирическим данным для определения коэффициента ползучести (учитывая влияние температуры) позволяет получить двойной степенной закон (который выведен и описан в [5-8]):

$$\phi(t, t') = \phi_T f_W \left((t'_e)^{-m} + \alpha \right) \cdot (t - t')^n. \quad (5)$$

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.

В результате внешних температурных воздействий, отсутствия термометрического равновесия с окружающей средой и экзотермии – в бетоне возникают температурные поля. Тепловые потоки, которые возникают в теле, состоят из кондуктивного переноса тепла (за счет теплопроводности) и конвективного (перенос тепла движущейся жидкостью). Формула (9) позволяет рассчитать функцию гидратации с учетом кондуктивного и конвективного тепловых потоков в бетоне [11-13]:

$$t'_e = \int_0^{t'} \beta_T \beta_H dt, \quad (6)$$

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

$$\beta_T = \exp \left[\frac{U_h}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right], \quad (7)$$

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

$$\beta_H = \frac{1}{1 + (7,5 - 7,5H)^4}, \quad (8)$$

где H – относительная влажность бетона.

$$\phi_T = \phi_0 \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right], \quad (9)$$

где U – энергия увеличения скорости ползучести бетона.

Но эта зависимость подходит лишь для конструкций, которые эксплуатируются при неизменяемом значении повышенной или высокой температуры.

Для учёта изменения температуры окружающей среды, влияния технологических циклов, или учёта энтальпии массивных бетонных конструкций авторами предложено находить значение функции температуры на каждом промежутке времени.

Тогда изменение функции температуры во времени отображается в виде кусочно-линейной зависимости $\phi_T(t)$, а формула (5) принимает вид:

$$\Phi(T, t, t') = \int_{t'}^{\tau} \phi_T(t) H(t') f(t) dt, \quad (10)$$

где $H(t') = f_w \cdot f(t'_e)$ – параметр, который отображает изменение физических характеристик бетона в зависимости от возраста бетона t' в момент приложения нагрузки.

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

Рассмотрим пример численного моделирования изменения температурного режима эксплуатации зданий. В ПК «ЛИРА-САПР» были созданы три расчетные схемы (РС) одинаковой конфигурации, но с использованием различных методов вычисления напряжений и деформаций, с целью исследования результатов расчета в зависимости от вида задания закона деформирования схемы и выбора закона ползучести.

При построении РС-1 были использованы универсальные стержневые КЭ-10 и пластинчатые КЭ-41. При расчете РС-2 и РС-3 учитывалась физическая нелинейность и ползучесть бетона, поэтому для их создания были использованы физически нелинейные стержневые и пластинчатые КЭ-210 и КЭ-241. В РС-2 закон ползучести был задан согласно

нормам Eurocode, а в РС-3 был задан 54-й кусочно-линейный закон термползучести, для учета изменения температурного режима. Для бетона и арматуры были заданы 25-й и 11-й экспоненциальные законы нелинейного деформирования соответственно.

Средняя температура эксплуатации конструкций в «горячих» цехах составляет 25-35 °С, а в летнее время эта температура колеблется в пределах 30-50 °С. На основании этих данных, в качестве примера был задан следующий температурный режим эксплуатации конструкции: девять месяцев (сентябрь - май) конструкция эксплуатируется при температуре 30 °С, а в летнее время температура поднимается до 50 °С.

На рис. 1 приведены изополя вертикальных перемещений рассмотренных расчётных схем, полученных на 50-тый день вычисления деформаций ползучести (для РС-2 и РС-3).

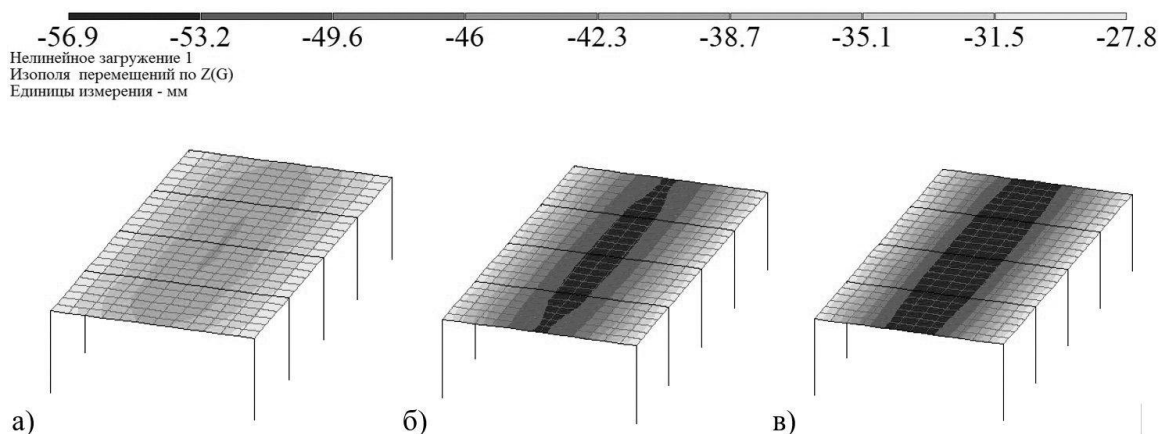


Рис. 1. Изополя вертикальных перемещений расчётных схем:
а – РС-1; б – РС-2; в – РС-3

На графике (рис. 2) показано сравнение значений максимальных вертикальных перемещений расчётных схем №1, 2 и 3 при статическом расчете (ст. расчет) и их последующее изменение во времени с учетом ползучести.

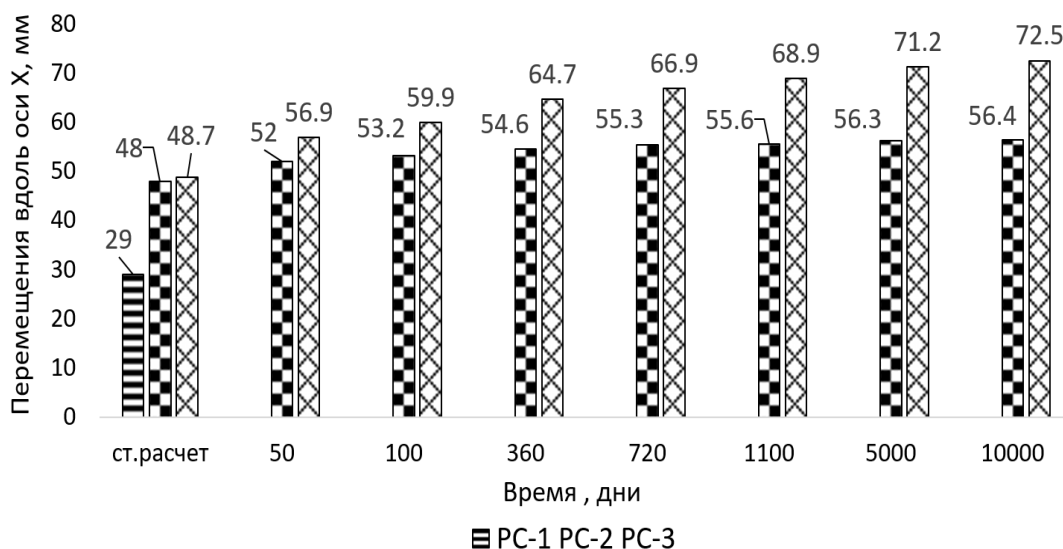


Рис. 2. Гистограмма максимальных прогибов расчётных схем

По данным графика видно, что полученные перемещения по результатам расчета с учётом влияния температуры значительно превышают те, что были получены при расчете ползучести согласно европейским нормам.

После физически-нелинейного расчета были определены элементы, в которых возникли трещины. Пример эпюр деформаций и напряжений в верхних и нижних волокнах в сечении колонны с трещиной в расчетной схеме №3 приведен на рис. 3.

В результате проявления деформаций ползучести, напряжения в железобетонных элементах начинают затухать. На рисунке 4 приведен график релаксации максимальных по модулю напряжений в рассматриваемом железобетонном сечении.

В таблице 1 приведены значения ширины и глубины раскрытия трещин в одном из пластинчатых конечных элементов в РС-2 и РС-3.

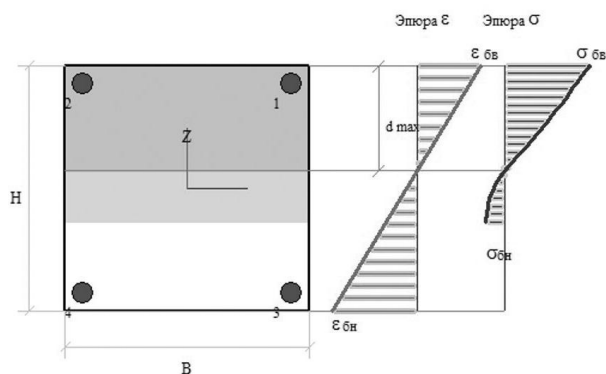


Рис.3. Эпюры деформаций и напряжений в сечении колонны с трещиной

Таблица 1 – Изменение параметров трещины в пластинчатом КЭ

Время	50 дней		1 год		3 года		30 лет	
	РС-2	РС-3	РС-2	РС-3	РС-2	РС-3	РС-2	РС-3
№ схемы	РС-2	РС-3	РС-2	РС-3	РС-2	РС-3	РС-2	РС-3
Ширина раскрытия трещины, мм	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02
Глубина раскрытия трещины, см	5,59	5,85	5,62	5,9	5,64	67,9	5,66	5,96

Из таблицы видно, что полученные перемещения по результатам расчета с учётом влияния температуры существенно выше, чем при расчете ползучести согласно Eurocode.

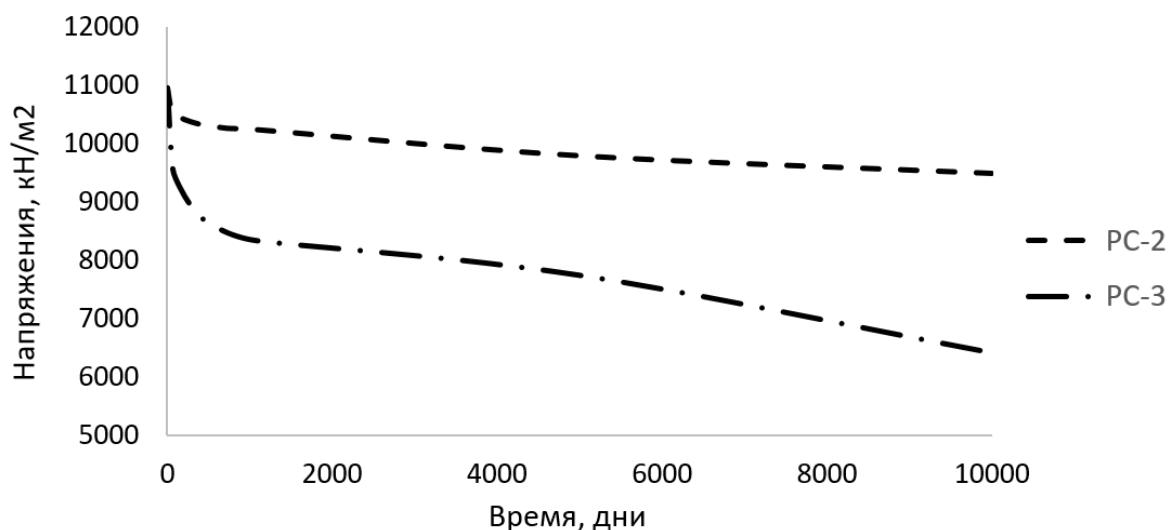


Рис. 4. Изменение напряжений в сечении колонны

Выводы. В статье показан процесс реализации расчета деформаций термползучести конструкции при помощи метода конечных элементов в программном комплексе ЛИРА-САПР. Проведено теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов с учетом ползучести согласно Eurocode и термползучести. Выполнено сравнение полученных результатов. Показано, что повышение температуры

эксплуатации сооружения оказывает значительное влияние на деформации ползучести.

Приведены разрешающие уравнения, разработана методика расчёта железобетонных конструкций на основе вязкоупругопластической модели бетона и двойного степенного закона термползучести. Данная методика подходит для любого температурного режима эксплуатации зданий и сооружений в условиях повышенных технологических или климатических температур.

Изменение температуры внешней среды оказывает значительное влияние на изменение физико-механических свойств бетона. Двойной степенной закон (формула 10), который реализован в ПК «ЛИРА-САПР» позволяет учитывать влияние изменения температурного режима эксплуатации на напряженно-деформированное состояние конструкции при расчете любых гражданских и промышленных зданий и сооружений.

Литература

1. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на температурные и влажностные воздействия (с учетом ползучести) / С.В. Александровский. – М.: Стройиздат, 1966. – 443 с.
2. Арутюнян Н.Х. Некоторые вопросы теории ползучести / Н.Х. Арутюнян. – М.: Гостехтеориздат, 1952. – 323 с.
3. Городецкий А.С. Компьютерные модели конструкций / А.С. Городецкий, И.Д. Евзеров. – М.: Изд-во АСВ, 2009. – 360 с.
4. Тамразян А.Г. Механика ползучести бетона: монография / А.Г. Тамразян, С.Г. Есяян. – Москва: МГСУ, 2012. – 490 с.
5. Bazant Z.P. Concrete creep at variable humidity: constitutive law and mechanism / Z.P. Bazant, J.C. Chern // *Materials and constructions*. – Vol. 18, № 103 – 1985. – P. 1 – 20.
6. 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.
7. 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.
8. Bazant Z.P. Temperature effect on Concrete Creep Modeled by Microprestressing-Solidification Theory / Zdenek Bazant, Gianluca Cusatis, Luigi Cedolin // *Journal of engineering mechanics*. – 2004. – P. 691 – 699.
9. ACI Manual of Concrete Practice: Part 1 – 1980. – U.S.A., American Concrete Institute, 1980. – 453 p. – (Manual).
10. 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).
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. – P. 621 – 636.

Стаття надійшла 11.05.2017