

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ БЕТОНА
ПРИ ОЦЕНКЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
СТАЛЕБЕТОННЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЯ**

Плугин А.А., д.т.н., профессор,

Лобяк А.В., к.т.н., доцент

Головко Д.В., к.т.н.,

Украинский государственный университет железнодорожного транспорта

Lobiak@ukr.net

Аннотация. Рассмотрен подход учета ползучести бетона при расчете сталебетонных плит перекрытия, основанный на использовании обобщенной кинетической кривой длительного деформирования и феноменологических уравнений развития деформаций. В сочетании с известными способами реализации нелинейных свойств бетона и численного моделирования методом конечных элементов в среде программного комплекса, предложенная методика позволила исследовать напряженно-деформированное состояние сталебетонных плит с различными исходными параметрами и оценить их эксплуатационную надежность.

Ключевые слова: ползучесть бетона, метод конечных элементов, релаксация, коэффициент ползучести, номограмма, сталежелезобетон.

**МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЗУЧОСТІ БЕТОНУ
ПРИ ОЦІНЮВАННІ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ
СТАЛЕБЕТОННИХ ПЛИТ ПЕРЕКРИТТЯ**

Плугін А.А., д.т.н., професор,

Лобяк О.В., к.т.н., доцент,

Головко Д.В., к.т.н.,

Український державний університет залізничного транспорту

Lobiak@ukr.net

Анотація. Розглянуто підхід врахування повзучості бетону при розрахунку сталебетонних плит перекриття, заснований на використанні узагальненої кінетичної кривої тривалого деформування і феноменологічних рівнянь розвитку деформацій. У поєднанні з відомими способами реалізації нелінійних властивостей бетону і чисельного моделювання методом кінцевих елементів у середовищі програмного комплексу, запропонована методика дозволила дослідити напружено-деформований стан сталебетонних плит з різними вихідними параметрами і оцінити їх експлуатаційну надійність.

Ключові слова: повзучість бетону, метод кінцевих елементів, релаксація, коефіцієнт повзучості, номограма, сталезалізобетон.

**MODELING OF CONCRETE CREEP IN THE EVALUATION OF
STRESS-STRAIN STATE OF STEEL CONCRETE FLOOR SLABS**

Plugin A.A., Doctor of Engineering, Professor

Lobak A.V., Ph.D., Assistant Professor

Golovko D.V., Ph.D.

Ukrainian State University of Railway transport

Lobiak@ukr.net

Abstract. The article describes the approach to the account of concrete creep in calculating steel concrete floor slabs based on the use of generalized phenomenological kinetic equation of the Curve and deformation processes. In combination with the known ways of implementing non-linear properties of concrete and numerical simulation by using finite element method in the environment of the software system, the proposed method allows to investigate the stress-strain state of reinforced concrete slabs with different input parameters and to check their reliability. Demonstration of the proposed approach of modeling long-term deformation is presented on the example of a steel concrete slab simply supported along the contour of the plate. The slab is a structure of sheet metal and concrete. For joint operation of concrete and membrane loops are used. When calculating the parameters of creep relative humidity $RH=74\%$ and age of concrete of 28 days are taken into account. The calculations were performed in the software package. The model is made using three types of finite elements: membrane; physically non-linear volume elements; the elastic connection of the screed. For the mathematical description of concrete the exponential law of deformation was adopted, and the influence of creep was as a piecewise linear law in accordance with nomograms. Analyzing the results, we can see the redistribution of stresses and a significant increase of deformation due to creep of concrete.

Keywords: creep of concrete, finite element method, relaxation, creep factor, nomogram, steel-concrete, the steel-concrete.

Вступлення. На сьогоднішній день існує велике кількість методів розрахунок пластин з упругопластических матеріалів, дозволяючих моделювати роботу конструкції і враховувати нелінійні і реологіческіє властивості бетону. Такі розрахунок, як правило, пов'язані з громоздкими і складними вирахунок і саме головне – з немалою погрешністю. Можливі шляхи удосконалення бетонних і сталезалізобетонних конструкцій передбачають застосування більш адекватних способів моделювання нелінійних і реологіческіє властивості матеріалів, а цінна оцінка надійності і довговічності не може бути забезпечена без повного врахування особливостей деформування бетону. Многочисленні експериментальні дослідження свідчать, що в конструкціях з застосуванням бетону, знаходячись під тривалим дією навантажень, виникають неупругі деформації, які в декілька разів можуть перевищувати початкові, умовно упругі деформації. В зв'язі з цим, питання прогнозування тривалого деформування бетону в часі і пов'язаного з цим перерозподілом напружень між бетоном і сталлю є актуальним.

Найбільш гостро проблема повзучості бетону представляється для споруд з сталезалізобетону і в частині – для сталобетонних плит [1, 2]. Основними достоїнствами зовнішнього озброєння вигнутих конструкцій є: розташування робочої арматури у зовнішній межі розтягнутої зони; збільшення робочої висоти сечення; ізоляційні функції листа. Відзначені достоїнства сталобетонних конструкцій сприяли розвитку і застосуванню їх в нашій державі і за кордоном. При цьому, багато корисні властивості конструкцій з сталобетону будуть залежати в тому числі від перерозподілу зусиль, пов'язаного з процесами повзучості бетону.

Аналіз досліджень і постановка задачі. В існуючих теоріях повзучості широко використовуються два підходи прогнозування тривалих деформацій [3]. В відповідності з першим, поведінка матеріалу ґрунтується на механічних системах, побудованих з комбінацій елементів для моделювання механічних властивостей (модуля упругості і коефіцієнта в'язкості). В основу другого, феноменологіческіє підходу, покладені дані експериментів, встановлюючі залежності між деформаціями і часом (криві повзучості) або напруженням і часом (криві релаксації). Незважаючи на досягнуті успіхи, існуючі феноменологіческіє теорії недостатньо повно враховують деформації повзучості бетону. В частині, найбільш загальна спадкова теорія старіння бетону зв'язує необоротні деформації тільки з старінням і не враховує ту частину необоротних деформацій, яка є наслідком силового

воздействия и изменения структуры бетона.

Известно, что механизм длительного деформирования бетона зависит от характера внешнего воздействия, масштабного фактора, возраста и состава бетона, влажности среды, температуры, а также от степени нелинейности материала и уровня его напряженного состояния. Полноценный учет данных факторов и физически-нелинейных свойств бетона при оценке напряженно-деформированного состояния бетонных и сталежелезобетонных конструкций с течением длительного времени предполагает применение вычислительных комплексов в качестве основного инструмента компьютерного моделирования.

Программные комплексы, допускающие учет нелинейных и реологических свойства бетона, реализуют один из практических способов моделирования длительного деформирования, основанного на применении коэффициента ползучести [4]:

$$\varepsilon_{c,t} = \sigma_c / E_c (1 + \varphi(t, t_0)), \quad (1)$$

где $\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \beta(t, t_0)$,

φ_0 – коэффициент ползучести для $\varphi = \infty$;

$\beta(t, t_0)$ – коэффициент, описывающий развитие ползучести во времени;

t_0 – возраст бетона на момент первого нагружения.

Данная методика реализует учет 90% деформаций ползучести бетона за 20...25 лет службы в зависимости от влажности окружающей среды, начальной прочности и возраста бетона. Несмотря на это, данный способ не раскрывает истинный механизм кинетики длительного деформирования, применяя для различных стадий работы бетона постоянную функцию изменения коэффициента ползучести.

Принимая возможность реализации альтернативных методов учета ползучести на базе вычислительных комплексов, нами предложен способ, основанный на коллоидно-химическом представлении механизма длительного деформирования бетона [5].

Результаты исследований. В основу теории положено более общее представление о кинетической кривой длительного деформирования, и, соответственно, феноменологические уравнения развития деформаций в зависимости от стадии работы бетона. При этом выделяется четыре стадии деформации (рис. 1) – сжатие в условно упругой постановке, которое длится в течение долей секунды, стадия быстронатекающей ползучести (1), заканчивающаяся через нескольких минут или десятков минут, нелинейная (2) и линейная (3) часть обычной ползучести, а также стадия долговременной ползучести (4).

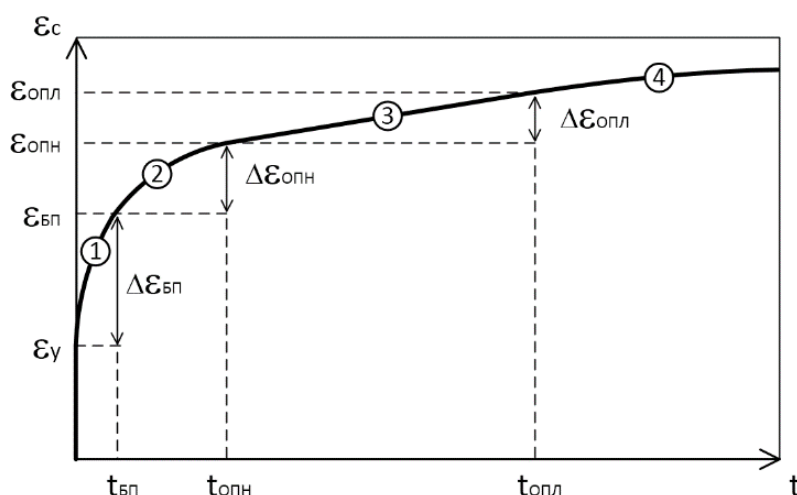


Рис. 1. Обобщенная кинетическая кривая ползучести бетона

С учетом графика на рис. 1 представлена схема длительного деформирования бетона при сжатии и общее уравнение деформаций бетона:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_y + \Delta\varepsilon_{бп} + \Delta\varepsilon_{опн} + \Delta\varepsilon_{опл} + \Delta\varepsilon_{дп} \quad (2)$$

Частные уравнения, моделирующую кинетику деформирования на каждой из указанных стадий, имеют вид:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{c, \text{БП}}(t) &= \varepsilon_y + \Delta\varepsilon_{\text{БП}} \left(1 - e^{-t/T_r^{\text{БП}}}\right), \\ \varepsilon_{c, \text{ОПН}}(t) &= \varepsilon_{\text{БП}} + \Delta\varepsilon_{\text{ОПН}} \left(1 - e^{-t/T_r^{\text{ОПН}}}\right), \\ \varepsilon_{c, \text{ОПЛ}}(t) &= \varepsilon_{\text{ОПН}} + k_{\text{ОПЛ}}(t - t_{\text{ОПН}}), \\ \varepsilon_{c, \text{ДП}}(t) &= \varepsilon_{\text{ОПЛ}} + k_{\text{Д}}(t - t_{\text{ОПЛ}}),\end{aligned}\quad (3)$$

где $T_r^{\text{БП}}, T_r^{\text{ОПН}}$ – время релаксации в соответствии с дисперсно-фазовой моделью Терцаги на экспоненциальных стадиях деформирования;

$k_{\text{ОПЛ}}, k_{\text{Д}}$ – кинетические коэффициенты, отражающие скорость роста деформаций общей (на линейном участке) и долговременной ползучести.

С учетом последнего, выражение для определения коэффициента ползучести на любой стадии деформирования бетона принимает вид:

$$\varphi(t) = (\varepsilon_c(t) - \varepsilon_{c,y}) / \varepsilon_{c,y} \quad (4)$$

Полные относительные деформации бетона, соответствующие завершению стадий быстронатекающей ($\varepsilon_{\text{БП}}$) и обычной ($\varepsilon_{\text{ОПН}}, \varepsilon_{\text{ОПЛ}}$) ползучести, определяются исходя из гипотезы о механизме поведении субмикроструктуры бетона, состоящего из электрически заряженных частиц (глобул) гидросиликатного геля при воздействии на нее сжимающего напряжения. Предполагается, что предельные деформации ползучести определяются деформациями геля за счет сжатия ДЭС, фильтрации воды из сжатых зон конструкции в растянутые по законам безнапорной водопроницаемости, а кинетика долговременной ползучести будет зависеть от масштабного фактора при фильтрационном выдавливании воды из геля.

В качестве демонстрации представленных положений рассмотрим моделирование ползучести на примере сталебетонной, шарнирно-опертой по контуру плиты с размерами в плане 3×3 м и высотой 150 мм, которая состоит из металлического листа толщиной 1,2 мм с маркой стали Ст3кп2 и бетона класса С30/35. Для обеспечения совместной работы бетона и мембраны применяются петлевые анкера с шагом 150 мм. При расчете параметров ползучести учитывается относительная влажность RH=74% и возраст бетона (t_0)=28 сут. Номограммы ползучести, полученные в соответствии с [4] и по методике, основанной на коллоидно-химической теории (КХТ), представлены на рис. 2.

Решение задачи выполнено в среде программного комплекса Лира-САПР [6], что в полной мере позволяет раскрыть все особенности рассматриваемой конструкции и реализовать предложенную методику учета ползучести.

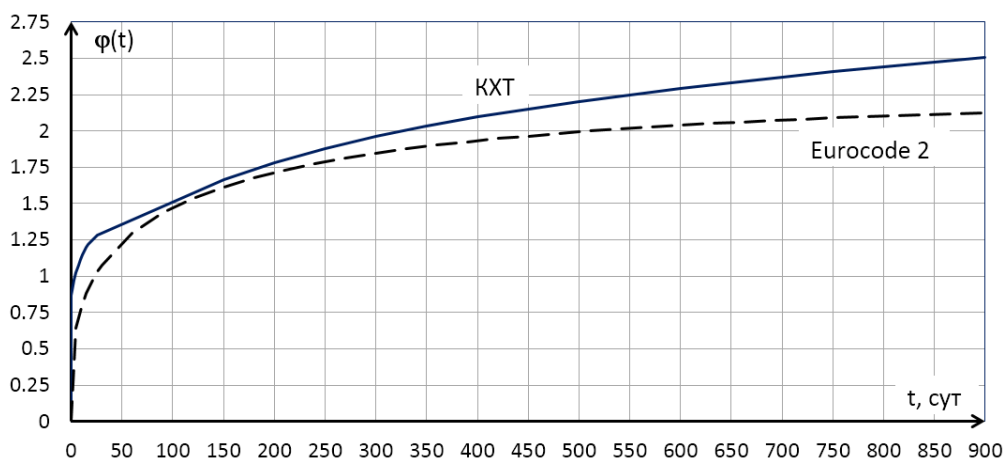


Рис. 2. Номограммы ползучести, полученные в соответствии с Eurocode 2 и в соответствии с коллоидно-химической теорией (КХТ)

Построение расчетной схемы сталебетонной плиты выполнено с использованием трех типов конечных элементов (КЭ). Моделирование стального листа выполнено с помощью универсальных КЭ оболочки, бетонного слоя – физически нелинейными пространственными изопараметрическими КЭ. Объединение мембраны и бетона учитывалось использованием двухузловых КЭ упругих связей. Для математического описания работы бетона принят экспоненциальный закон деформирования, а влияние ползучести учитывалось кусочно-линейным законом в соответствии с номограммами, приведенными на рис. 2. Нагрузка принималась равномерно-распределенной по всей поверхности плиты. Результат расчета параметров НДС плиты для различных временных периодов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета НДС сталебетонной плиты

Параметр НДС	Нелинейный расчет с учетом ползучести					
	28 сут.		365 сут.		900 сут.	
	EN	КХТ	EN	КХТ	EN	КХТ
Вертикальные перемещения в центре плиты, мм	5,31	5,73	6,87	7,14	7,28	7,97
Напряжения в стальном листе (мембране), МПа	76,4	80,6	91,9	94,6	95,9	103
Сжимающие напряжения в бетонном слое, МПа	-7,72	-7,53	-7,02	-6,9	-6,84	-6,53
Растягивающие напряжения в бетонном слое, МПа	1,86	1,87	1,89	1,9	1,9	1,91

Анализируя результаты можно видеть некоторое перераспределение напряжений и значительное увеличение перемещений вследствие ползучести бетона. В частности, по мере роста деформаций, напряжения в стальном листе увеличиваются, а в сжатом бетоне – снижаются. В зависимости от расчетного интервала времени предложенная методика в сравнении с [4] по деформациям показывает более завешенные результаты (на 8-10%).

Выводы. Принятый подход учета ползучести в сочетании с известными способами реализации нелинейных свойств бетона и численного моделирования методом конечных элементов, позволили уточнить НДС сталебетонной плиты с учетом коллоидно-химического представления о механизме длительного деформирования бетона.

Литература

1. Лобяк О.В. Напряжено-деформований та граничний стан сталебетонних пустотних плит / О.В. Лобяк, Д.В. Головка // Зб. наук. праць УкрДУЗТ. – Харків, 2015. – Вип. 153. – С. 73-83.
2. Лобяк О.В. Моделирование работы сталебетонных пустотных плит перекрытий с учетом нелинейных свойств конструкций и материалов / О.В. Лобяк, Д.В. Головка // Зб. наук. статей. Серія: Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація. Полтава: ПолтНТУ, 2014. – Вип. 11. – С.156-162.
3. Галустов К.З. К вопросу о нелинейной теории ползучести бетона при одноосном сжатии. / К.З. Галустов, А.А. Гвоздев // Изв. АН СССР. Механика твердого тела, 1972. – №1. – С. 85-92.
4. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. EN 1992 – 1.1: General Rules and Rules for buildings. – Brussels: CEN, 2004. – 226 p.
5. Плугин А.Н. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них: монография в 3-х тт. Т. 3. Теория прочности, разрушения и долговечности бетона, железобетона и конструкций из них / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, Л.В. Трикоз и др. // под ред. д.х.н., проф. А.Н. Плугина. – К.: Наук. думка, 2012. – 286 с.
6. Городецкий А.С. Компьютерные модели конструкций / А.С. Городецкий, И.Д. Евзеров. – К.: Факт, 2007. – 394 с.