

УДК 624.042

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ТРУБОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОМ И ДЛИТЕЛЬНОМ НАГРУЖЕНИИ**

Д-р техн. наук Г. Л. Ватуля, канд. техн. наук А. В. Лобяк (УкрГУЖТ),  
инж. В. Б. Черногиль (ООО «Национальные ресурсы»)

**МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ТРУБОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИ КОРОТКОЧАСНОМУ ТА ТРИВАЛОМУ НАВАНТАЖЕННІ**

Д-р техн. наук Г. Л. Ватуля, канд. техн. наук А. В. Лобяк (УкрДУЗТ),  
інж. В. Б. Черногіль (ТОВ «Національні ресурси»)

**SIMULATION OF PERFORMANCE OF CIRCULAR CFST COLUMNS UNDER SHORT-TIME AND LONG-TIME LOAD**

**Doct. of techn. sciences G. Vatulia, cand. of techn. sciences A. Lobiak, engineer V. Chernogil**

*Рассмотрен подход расчета трубобетонных элементов с учетом физической нелинейности материалов, геометрической нелинейности обоймы и эффекта увеличения прочности ядра. Методика использует шагово-итерационный алгоритм с участием аналитических зависимостей и конечно-элементного моделирования. Учет ползучести бетона основан на использовании обобщенной кинетической кривой длительного деформирования. Адекватность методики обеспечивается сопоставлением экспериментальных и теоретических данных. Предложенная методика позволила исследовать напряженно-деформированное и предельное состояние трубобетонных элементов, а также оценить их эффективность с учетом фактора времени.*

**Ключевые слова:** трубобетон, эффект обоймы, ползучесть, физическая нелинейность, метод конечных элементов.

*Розглянуто підхід розрахунку трубобетонних елементів з урахуванням фізичної нелінійності матеріалів, геометричної нелінійності обойми та ефекту збільшення міцності ядра. Методика використовує кроково-ітераційний алгоритм за участю аналітичних залежностей і скінченно-елементного моделювання. Облік повзучості бетону побудований на використанні узагальненої кінетичної кривої деформування. Адекватність методики забезпечується порівнянням експериментальних і теоретичних даних. Запропонована методика дала змогу дослідити напружено-деформований та граничний стан трубобетонних елементів, а також оцінити їх ефективність з урахуванням фактора часу.*

**Ключові слова:** трубобетон, ефект обойми, повзучість, фізична нелінійність, метод скінченних елементів.

*The method of calculation of concrete pipe elements with consideration of physical nonlinearity of materials, geometric nonlinearity of the confinement and the effect of the gain in strength of the core is considered. The method uses a step iteration algorithm which involves analytical dependencies and the ultimate element simulation method. Allowance for creep of concrete is based on using the generalized kinetic long-term deformation curve and phenomenological deformation development equations. Creep of concrete is controlled through new structural factors that determine the structure of cement rock layers between sand and mortar grains between chip grains. The method is validated by comparing experimental findings and theoretical data. The suggested method allowed*

to study the stress-strain and limit state of concrete pipe elements, as well as to evaluate their effectiveness with account for the time factor.

**Keywords:** concrete pipe elements, effect of the gain, creep, physical nonlinearity, finite element method.

**Введение.** Увеличение масштабов строительства транспортных объектов и высотных зданий требует применения надежных и экономически эффективных вертикальных несущих конструкций. Один из способов обеспечения заданных целей заключается в применении трубобетонных элементов, обладающих высокой несущей способностью, надежностью и долговечностью при малых поперечных сечениях.

Трубобетонные конструкции широко применяются в строительной практике за счет своей эффективности, исключения опалубочных и арматурных работ, снижения поперечного сечения колонн, расхода металла и бетона, сокращения сроков строительства и трудозатрат [1]. При этом, несмотря на фундаментальные исследования в этой области, в практике проектирования нет полноценной методики расчета напряженно-деформированного состояния трубобетонных элементов при кратковременных и длительных нагрузках, адекватно отражающей его специфические особенности. В основе этой проблемы лежат сложности работы системы сердечник-оболочка, трудности моделирования эффекта обоймы и контактного взаимодействия между ядром и оболочкой, геометрической нелинейности обоймы и физической нелинейности бетона.

**Анализ последних исследований и публикаций.** На сегодняшний день существует множество аналитических методик расчета сжатых трубобетонных элементов [2]. Для сталебетона применимы и общий подход к расчету железобетонных конструкций с жестким или косвенным армированием, и способы приведения бетона к стали, численные методы расчета на основе нелинейной деформационной модели, а также подходы, рекомендуемые Eurocode 4 [3]. Существующие способы

учета реологических свойств бетонного ядра, как правило, отличаются сложными вычислениями и немалой погрешностью.

**Определение цели и задачи исследования.** Данная работа направлена на повышение эффективности трубобетонных элементов путем построения комплексной методики расчета прочности, наиболее адекватно учитывающей особенности напряженно-деформированного состояния бетонного ядра и стальной оболочки при действии как кратковременной, так и длительной нагрузки.

**Основная часть исследования.** Решение задачи построено на основе нелинейной модели с учетом особенностей деформирования ядра и обоймы в условиях неоднородного напряженного состояния. Основная сложность при расчете трубобетона в такой постановке заключается в отсутствии диаграмм деформирования ядра  $\sigma_{c3} - \varepsilon_{c3}$ , внешний вид которых будет определяться заранее неизвестной величиной бокового давления стальной обоймы на бетон  $\sigma_{cr}$  (рис. 1).

Реализовать данное решение математически, учитывая современный уровень компьютерных технологий, возможно с применением вычислительного комплекса как основного инструмента моделирования [4]. Предлагаемая методика использует шагово-итерационный алгоритм. Принимается, что на первой итерации первого шага нагружения боковое давление  $\sigma_{cr} = 0$  и прочность ядра определяется прочностью цилиндра осевому сжатию  $f_{cc}$ . Далее осуществляется итерационный процесс поиска истинных значений прочности  $f_{c3}$  в соответствии с критерием Н. И. Карпенко [5] при объемном сжатии элемента:

$$f_{c3} = f_{cc} + k\sigma_{cr} . \quad (1)$$

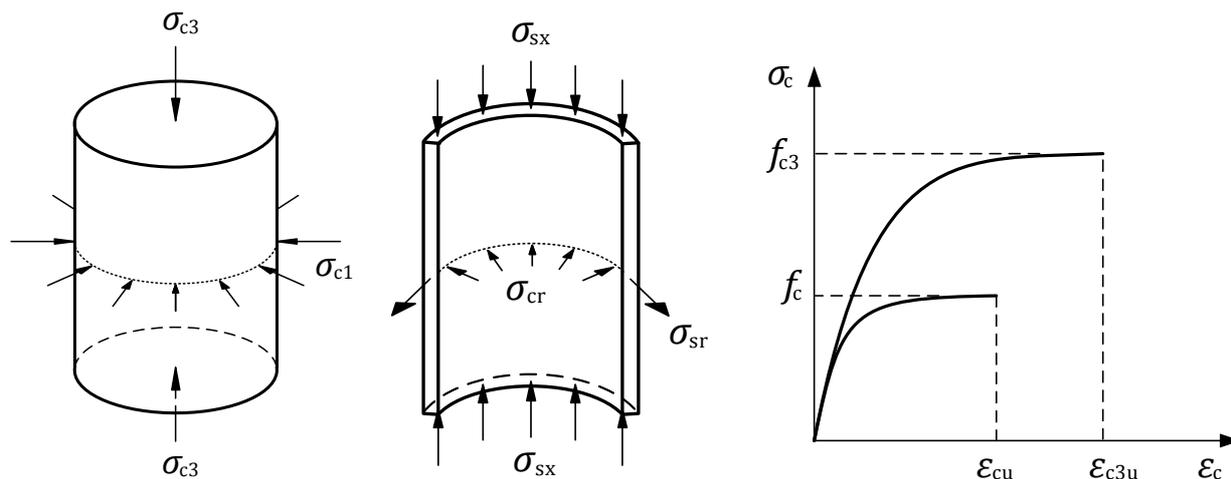


Рис. 1. Напряженное состояние бетонного сердечника и стальной оболочки

Коэффициент бокового давления  $k$  определяется в зависимости от относительного уровня бокового обжатия  $m = \sigma_{c1}/\sigma_{c3}$ :

$$k = 1/(0.1 + 0.9m) . \quad (2)$$

Последняя итерация определяет истинные компоненты напряженно-деформированного состояния первого шага нагружения: продольные  $\sigma_{c3}$  и поперечные  $\sigma_{c1}$  напряжения в бетоне, сжимающие  $\sigma_{sx}$  и радиальные  $\sigma_{sr}$  напряжения в обойме, а также относительные деформации  $\epsilon_{c3}, \epsilon_{c1}, \epsilon_{sx}, \epsilon_{sr}$ . Далее выполняется расчет на второй и последующие шаги нагружения вплоть до исчерпания несущей способности. При этом допускается, что предельное состояние, для сжатия с малыми эксцентриситетами, наступает при выполнении одного из условий: при исчерпании прочности бетонного ядра  $\sigma_{c3} = f_{c3}$ , обоймы  $\sigma_{sr} = f_y$  или в результате достижения предельных деформаций бетона  $\epsilon_{c3} = \epsilon_{cu}$ .

Модель, реализующая расчет НДС, составлена из двух блоков (обоймы и бетонного сердечника), объединенных в

совместную работу при помощи односторонних связей, воспринимающих сжатие и сдвиг (рис. 2, а). Обойма моделируется с учетом физической и геометрической нелинейности, а материал ядра задается переменными законами деформирования. Способ передачи нагрузки обеспечивает перераспределение усилий по плоскости нагружения.

Проверка адекватности методики выполнена сопоставлением результатов расчета с данными экспериментов. Принятые элементы выполнены из трубы 102×3 длиной 500 мм, заполненной бетоном с призменной прочностью 16 МПа. Передача нагрузки осуществляется одновременно на бетон и трубу. Результаты расчетов для предельного состояния показаны на полях напряжений (рис. 2).

Анализ результатов расчета выполнен по зависимостям изменения напряжений (рис. 3, а) и деформаций (рис. 4).

Диаграмма прочности ядра  $f_{c3}$  (рис. 3, б) имеет общее решение с кривой продольных напряжений  $\sigma_{c3}$ , что устанавливает прочностный критерий предельного состояния  $N_{plf} = 652$  кН. Несущая способность  $N_{pl\epsilon} = 648$  кН получена по величине предельных относительных деформаций  $\epsilon_{cu}$ . Анализ графиков показывает

примерно одинаковый вид зависимостей изменения деформаций в ядре и обойме, что свидетельствует об их совместной работе. Коэффициент, устанавливающий

эффект обоймы, определяется соотношением прочности сердечника в предельном и исходном состоянии (при  $D/t = 34, k_{c3} = 2.6$ ).

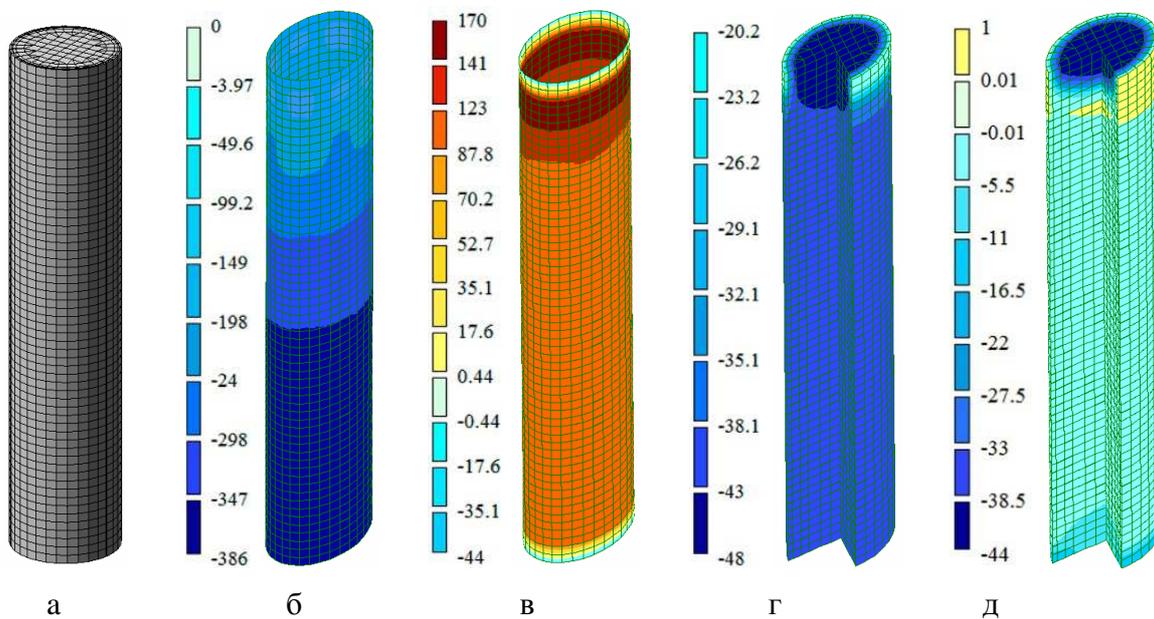


Рис. 2. Напряженное состояние трубобетонного элемента: а – общий вид модели; б и в – напряжения в обойме  $\sigma_{sx}$  и  $\sigma_{sr}$ ; г и д – напряжения в ядре  $\sigma_{c3}$  и  $\sigma_{c1}$

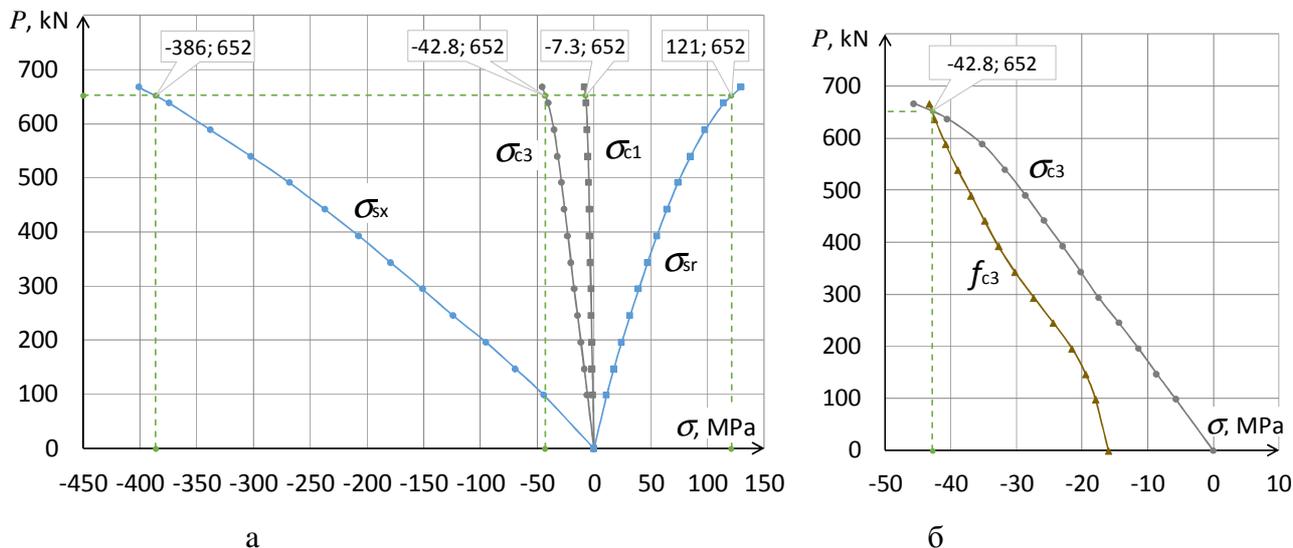


Рис. 3. Графики изменения напряжений: а – графики напряжений; б – диаграмма прочности ядра  $f_{c3}$  и график напряжений в бетоне  $\sigma_{c3}$

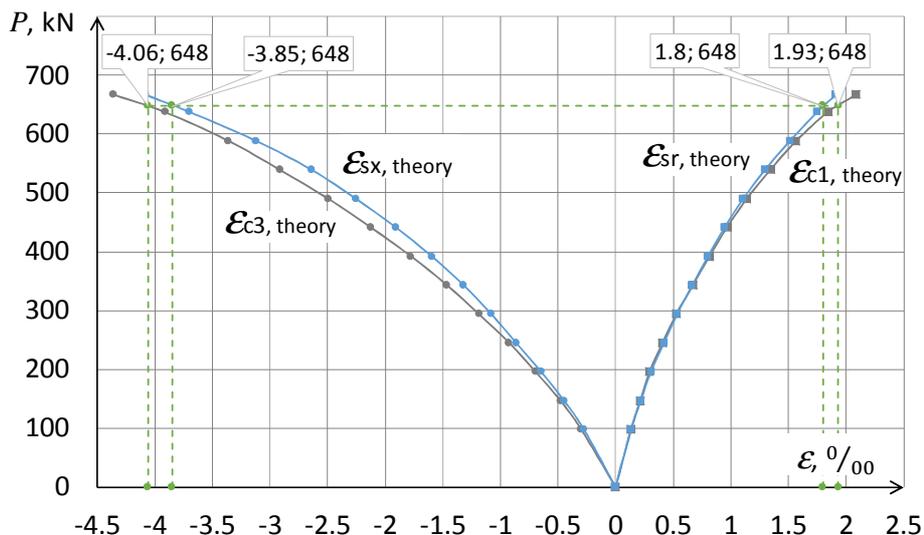


Рис. 4. Графики изменения деформаций в труботетонном элементе

Образцы для экспериментальных исследований (рис. 5) изготавливались в лаборатории кафедры строительной механики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Для бетонной смеси использовали мелкозернистый бетон с В/Ц = 0.55, портландцемент М500 и щебень

фракцией 2.5-7 мм. Деформации в бетоне определялись в геометрическом центре объема ядра при помощи глубинных тензометрических датчиков [6]. Установлено, что средняя погрешность, полученная для относительных деформаций, составляет 10.5 %. По несущей способности не превышает 2.5 %.

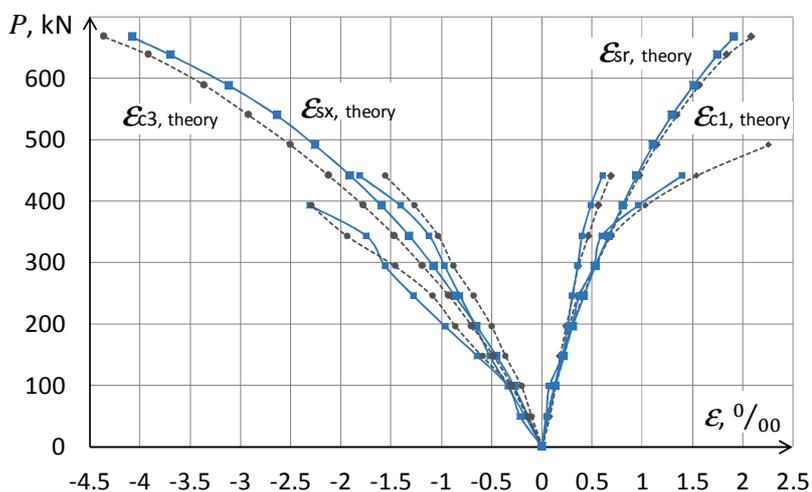


Рис. 5. Результаты экспериментальных исследований

Принимая удовлетворительную сходимость теоретических и опытных данных для кратковременных нагрузок, на следующем этапе рассматривается влияние

фактора времени на деформации в ядре и в целом на НДС элемента.

Многочисленные экспериментальные исследования свидетельствуют, что в

конструкциях с применением бетона, находящихся под длительным действием нагрузок, возникают неупругие деформации, которые в несколько раз могут превышать начальные, условно упругие деформации. Наиболее остро проблема ползучести представляется для сооружений из сталежелезобетона и в частности – для сталебетонных плит [7,8] и трубобетона. В связи с этим, вопросы прогнозирования длительного деформирования бетонного ядра в трубобетонных элементах и синхронного перераспределения усилий остаются актуальными.

В основу национальных строительных норм Украины, гармонизированных с Eurocode 2 [9], положен наиболее простой, феноменологический подход, основанный на данных экспериментов и устанавливающий зависимость между деформациями и временем через коэффициент ползучести  $\varphi(t, t_0)$ . В соответствии с этой методикой предельные деформации ползучести определяются коэффициентом, зависящим от средней прочности бетона, его возраста и относительной влажности, а развитие

ползучести во времени  $t$  зависит от относительной влажности и размеров поперечного сечения.

$$\varepsilon_{c,t} = \sigma_c / E_c [1 + \varphi_0 \beta(t, t_0)] , \quad (3)$$

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

$t_0$  – возраст бетона на момент первого нагружения.

Несмотря на свои достоинства, данный способ не позволяет управлять механизмом деформирования бетона и влиять на предельные деформации ползучести. Принимая возможность реализации альтернативных методов учета ползучести в среде вычислительных комплексов, предлагается методика, основанная на коллоидно-химическом представлении механизма длительного деформирования бетона в соответствии с теорией профессора А. А. Плугина [10]. В основу теории положено более точное представление о кинетической кривой деформирования бетона (рис. 6).

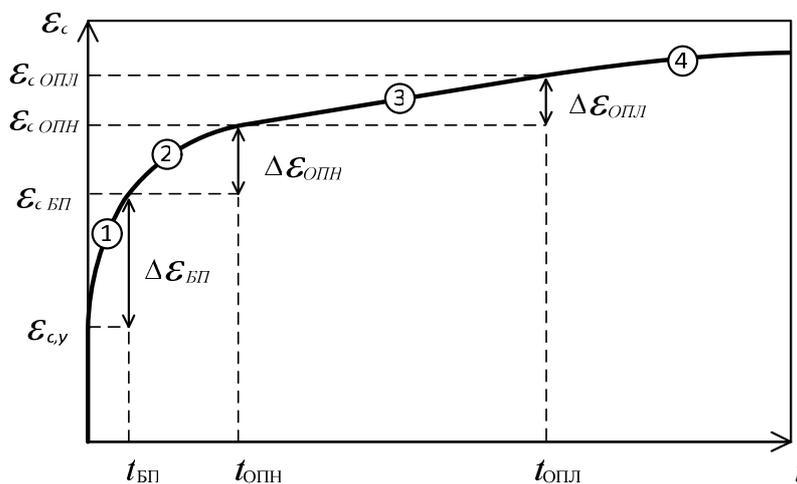


Рис. 6. Обобщенная кинетическая номограмма ползучести бетона

В результате получены уравнения развития деформаций в зависимости от 4 стадий работы бетона: сжатия в условно упругой постановке, стадии быстрой

ползучести (1), обычной ползучести, состоящей из нелинейной (2) и линейной (3) части, а также стадии долговременной ползучести (4). Результаты подтверждаются

експериментальними дослідженнями при  
длительном нагріванні цементних призм  
розміром 10×10×40 см.

В соответствии с рис. 6 схема  
длительного деформирования бетона при  
сжатии и общее уравнение деформаций  
бетона принимает вид:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_y + \Delta\varepsilon_{БП} + \Delta\varepsilon_{ОПН} + \Delta\varepsilon_{ОПЛ} + \Delta\varepsilon_{ДП} \quad (4)$$

Частные уравнения, моделирующие кинетику деформаций каждой стадии:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{c,БП}(t) &= \varepsilon_y + \Delta\varepsilon_{БП}(1 - e^{-t/T_r^{БП}}), \\ \varepsilon_{c,ОПН}(t) &= \varepsilon_{БП} + \Delta\varepsilon_{ОПН}(1 - e^{-t/T_r^{ОПН}}), \\ \varepsilon_{c,ОПЛ}(t) &= \varepsilon_{ОПН} + k_{ОПЛ}(t - t_{ОПН}), \\ \varepsilon_{c,ДП}(t) &= \varepsilon_{ОПЛ} + k_{ДП}(t - t_{ОПЛ}), \end{aligned} \quad (5)$$

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

$k_{ОПЛ}$ ,  $k_{ДП}$  – кинетические коэффи-  
циенты, отражающие скорость роста  
деформаций общей (на линейном участке)  
и долговременной ползучести.

Коэффициент ползучести на любой  
стадии деформирования

$$\varphi(t) = (\varepsilon_c(t) - \varepsilon_{c,y}) / \varepsilon_{c,y} \quad (6)$$

Полные относительные деформации  
бетона, соответствующие завершению ста-  
дий быстроснатекающей ( $\varepsilon_{c,БП}$ ) и обычной  
( $\varepsilon_{c,ОПН}$ ,  $\varepsilon_{c,ОПЛ}$ ) ползучести, определяют-

ся исходя из гипотезы о механизме  
поведения субмикроструктуры бетона,  
состоящего из электрически заряженных  
частиц (глобул) гидросиликатного геля, при  
воздействии на нее сжимающего  
напряжения. Предполагается, что предель-  
ные деформации ползучести определяются  
деформациями геля за счет сжатия ДЭС,  
фильтрации воды из сжатых зон в  
растянутые по законам безнапорной  
водопроницаемости, а кинетика ползучести  
будет зависеть от масштабного фактора при  
фильтрационном выдавливании воды из  
геля.

Управление деформациями  
ползучести осуществляется через новые  
структурные коэффициенты,  
определяющие строение прослоек  
цементного камня между зёрнами песка и  
раствора между зёрнами щебня:

$$\alpha = V_p / V_{нус}^{Ш} = \left( \frac{\Pi}{\rho^{\Pi}} + \frac{\Pi}{\rho^{\Pi}} + \frac{B}{\rho^{\Pi}} \right) / \left( \frac{\Pi}{\rho_{нас}^{Ш}} \Pi_{нус}^{Ш} \right), \quad (7)$$

$$\mu = V_{ЦТ} / V_{нус}^{\Pi} = \left( \frac{\Pi}{\rho^{\Pi}} + \frac{B}{\rho^{\Pi}} \right) / \left( \frac{\Pi}{\rho_{нас}^{\Pi}} \Pi_{нус}^{\Pi} \right).$$

Оптимальные коэффициенты  $\alpha_{opt}$  и  $\mu_{opt}$  получены из условия наиболее полного контакта, который снижает расклинивающее давление и, соответственно, деформации сжатия и микротрещины.

Предложен алгоритм расчета на длительное действие нагрузки (рис. 7),

который в сочетании с программным комплексом Лири-САПР позволяет выполнять уточненный расчет конструкций на длительные воздействия и управлять деформациями ползучести через структурные характеристики  $\alpha$  и  $\mu$ .

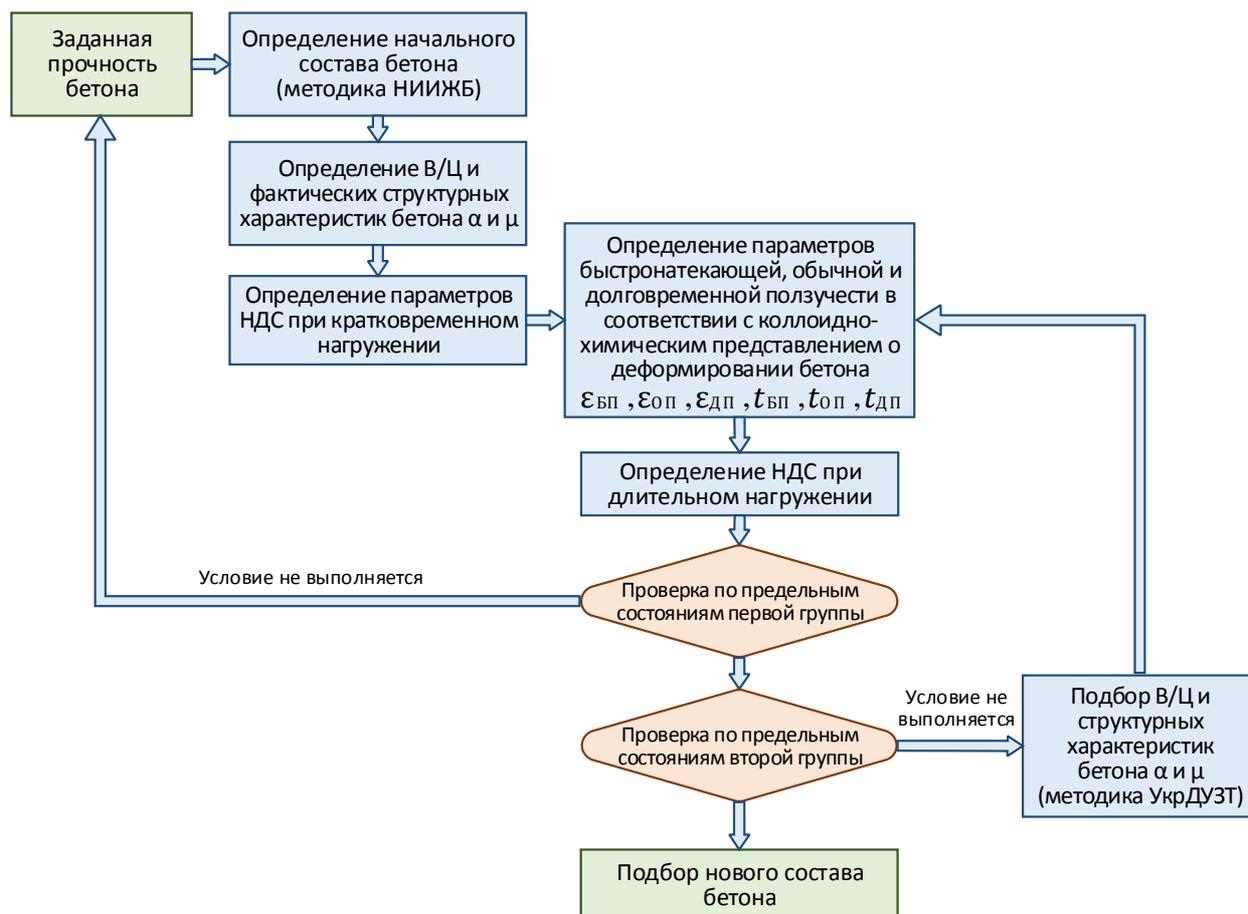


Рис. 7. Алгоритм минимизации предельных деформаций ползучести

Для определения дозировки составляющих бетона по заданным характеристикам применяется специализированная программа ПСБ, разработанная на кафедре строительных материалов, конструкций и сооружений Украинского государственного университета железнодорожного транспорта.

Для рассматриваемых трубобетонных элементов расчет с учетом длительного действия нагрузки установил значительное перераспределение напряжений в сторону обоймы (рис. 8). Так, например, через 730 суток при нагрузке, равной 50 % от несущей способности, продольные  $\sigma_{sx}$  и поперечные  $\sigma_{sr}$  напряжения в обойме увеличиваются соответственно на 60 % и

70 %. Продольные напряжения в ядре  $\sigma_{c3}$  снижаются на 40 %, а поперечные напряжения  $\sigma_{c1}$ , наоборот, увеличиваются на 50 %. Прочность бетонного ядра  $f_{c3}$  за

период длительного действия нагрузки дополнительно увеличивается на 20 %. На 70 % увеличиваются продольные деформации в ядре  $\epsilon_{c3}$ .

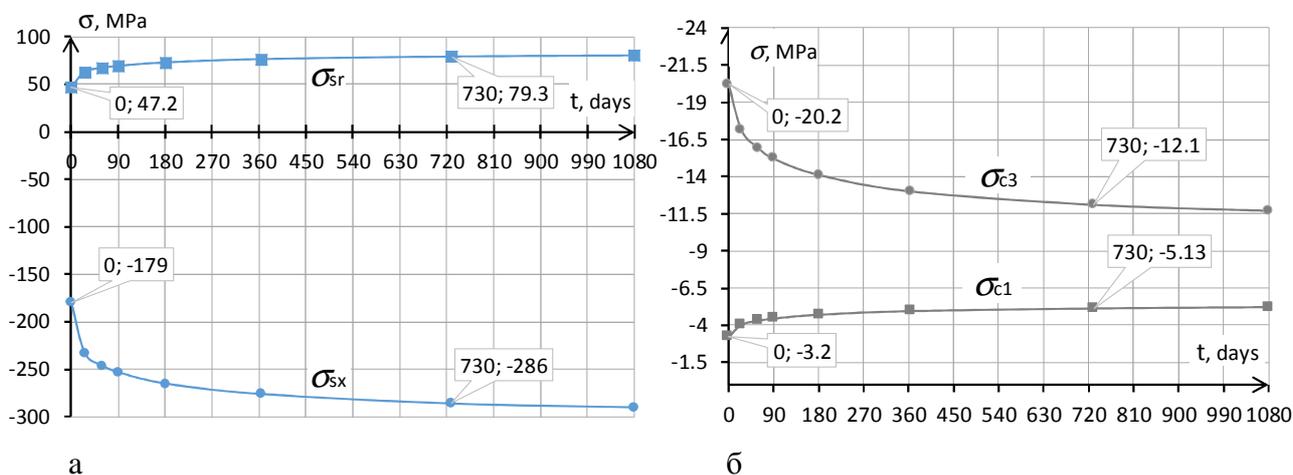


Рис. 8. Графики изменения напряжений: а – изменения напряжений  $\sigma_{sx}$  и  $\sigma_{sr}$  в обойме; б – изменения напряжений  $\sigma_{c3}$  и  $\sigma_{c1}$  в ядре

**Выводы из исследования и перспективы, дальнейшее развитие в данном направлении.** В результате выполненных исследований получена методика расчета напряженно-деформированного состояния и несущей способности трубобетонных элементов с учетом кратковременного и длительного действия нагрузки, физической нелинейности материалов, геометрической нелинейности обоймы, эффектов обжатия бетона и увеличения прочности ядра. Адекватность методики обеспечивается

сопоставлением экспериментальных и теоретических результатов.

Принятый подход учета длительного нагружения включает алгоритм управления ползучестью через структурные характеристики бетона. Также установлено, что длительные процессы, которые происходят в бетонном ядре, существенно влияют на напряженно-деформированное состояние. Эффективность трубобетона со временем не снижается и будет зависеть от рационального состава бетона и оптимальных соотношений конструктивных параметров.

#### Список использованных источников

1. Mechanical Properties of High Strength Concrete Filled Steel Tubular Columns [Текст] / Ke Feng Tan, Lai Bao Liu // Advanced Materials Research Vols. 472-475 (2012) – P. 1119-1125.
2. Стороженко, Л. И. Сравнение методик расчета трубобетонных конструкций [Текст] / Л. И. Стороженко, А. В. Семко // Коммунальное хозяйство городов: науч.-техн. сб. – К.: Техника, 2005. – Вып. 63. – С. 59-70.

3. Eurocode 4: EN 1994-1-1: 2004 Design of composite steel and concrete structures. Part 1.1. Brussels, 2004. – 127 p.
4. Городецкий, А. С. Компьютерные модели конструкций [Текст] / А. С. Городецкий, И. Д. Евзеров. – К.: Факт, 2007. – 394 с.
5. Карпенко, Н. И. Общие модели механики железобетона [Текст] / Н. И. Карпенко. – М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.
6. Ватуля, Г. Л. Определение деформаций бетона с помощью глубинных датчиков [Текст] / Г. Л. Ватуля, Е. И. Галагура, Д. Г. Петренко // Вестник ПНИПУ: Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – Пермь, 2014. – № 2. – С. 48-56.
7. Лобяк, О. В. Моделирование работы сталебетонных пустотных плит перекрытий с учетом нелинейных свойств конструкций и материалов [Текст] / О. В. Лобяк, Д. В. Головки // Зб. наук. статей. Сер. Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація. – Полтава: ПолтНТУ, 2014. – Вип. 11. – С. 156-162.
8. Лобяк, А. В. Моделирование ползучести бетона при оценке напряженно-деформированного состояния сталебетонных плит перекрытия [Текст] / А. В. Лобяк., А. А. Плугин, Д. В. Головки // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса: ОДАБА, 2016. – Вип. 63. – С. 79-83.
9. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. EN 1992 – 1.1: General Rules and Rules for buildings. – Brussels: CEN, 2004. – 226 p.
10. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них [Текст]: монография в 3-х т. 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-ра хим. наук, проф. А. Н. Плугина. – К.: Наук. думка, 2012. – 286 с.

---

Ватуля Гліб Леонідович, д-р техн. наук, доцент, завідувач кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-70. E-mail: glebvatulya@gmail.com.

Лобяк Олексій Вікторович, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-70. E-mail: Lobiak@ukr.net.  
Черногіль Віталій Богданович, інженер ТОВ «Національні ресурси».

Vatulia Glib, DSc, associate Professor, Head of Structural mechanics and hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport, Tel.: (057) 730-10-70. E-mail: glebvatulya@gmail.com.  
Lobiak Alexey, Ph.D., Department of structural mechanics and hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport, Tel.: (057) 730-10-70. E-mail: Lobiak@ukr.net.  
Chernogil Vitaliy, engineer, National Resources Ltd.

Стаття прийнята 13.06.2017 р.