

*Корозников А.Е.,*

*Студент,*

*2 курс, факультет «Строительство»*

*Санкт-Петербургский Государственный архитектурно-строительный*

*университет*

*Россия, г. Санкт-Петербург*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ БЕТОНА. УЧЕТ ПОЛЗУЧЕСТИ**

***Аннотация:** В данной статье рассматриваются особенности моделирования работы бетона. Описание теории физически нелинейной работы бетона. Учет ползучести бетона по российским нормативным документам и европейским.*

***Ключевые слова:** бетон, арматура, деформации, напряжения, ползучесть.*

***Annotation:** This article examines the specifics of concrete performance modeling. It describes the theory of physically nonlinear concrete performance. It also addresses concrete creep according to Russian and European regulations.*

***Key words:** concrete, reinforcement, deformations, stresses, creep.*

### **Эволюция подходов к моделированию работы бетона.**

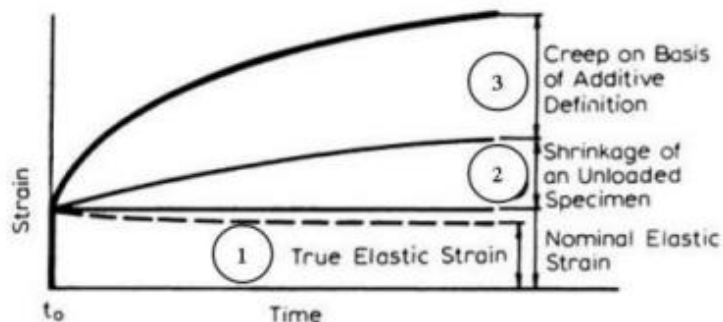
Первые модели поведения бетона основывались на концепции линейной упругости, закреплённой в ранних нормах проектирования. Однако экспериментальные исследования, проведенные в 1930-1950-е гг. О. Я. Бергом, А. А. Гвоздевым, В. И. Мурашовым [1] и другими авторами показали, что такая идеализация применима только в пределах очень малых напряжений.

Наиболее полно современная теория физически нелинейной работы железобетона отражена в исследованиях А.А. Гвоздева, В.И. Мурашева [1], Н.

И. Карпенко [2], В. М. Бондаренко [3] и других авторов. Среди основных факторов, которые обуславливают нелинейную связь между напряжениями и деформациями железобетонных конструкций, можно отметить образование и развитие трещин, нарушение сцепления арматуры с бетоном, неупругие и пластические деформации бетона, ползучесть, усадка бетона [4]. Также следует отметить, что свойства бетона и арматуры, подвергавшихся тепловым воздействиям, циклическим силовым воздействиям, динамическим воздействиям могут существенно отличаться от свойств материалов в стандартных условиях. Особенности работы и расчета конструкций при таких воздействиях в диссертации не рассматриваются.

Совместность работы бетона и арматуры оказывает существенное влияние на характер деформирования железобетонного элемента [3]. По результатам многочисленных экспериментальных и численных исследований разработаны различные теоретические линейные и нелинейные модели, учитывающие распределение касательных напряжений сцепления арматуры и бетона как функции, зависящие от неравномерности деформаций арматуры и бетона (их взаимных смещений), ширины раскрытия трещин [3, 2].

Общие деформации бетона  $\varepsilon_{c,tot}$  определяются как сумма мгновенных деформаций бетона (включающих линейную и нелинейную составляющую) и длительных деформаций, вызванных ползучестью и усадкой, поскольку, как известно, зависимость между напряжениями и деформациями бетона является функцией времени. При этом деформации ползучести могут в несколько раз превосходить мгновенные деформации от нагрузки [5] (см. Рисунок 1). Воздействия на здания, обусловленные деформациями основания, согласно [6] относятся к длительно действующим нагрузкам, поэтому при расчетах взаимодействия здания и основания непременно должна учитываться ползучесть бетона.



**Рисунок 1. Деформации бетона, зависящие от времени, при длительном действии нагрузки (1-упругая деформация, 2-деформации ползучести, 3-деформации усадки)**

### **Оценка влияния ползучести бетона.**

Учет влияния ползучести на напряженно-деформированное состояние железобетонных конструкций, эффекты которой проявляются при длительном действии нагрузки, в действующих нормах проектирования СП 63.13330.2012 [7] сводится к использованию модуля деформаций  $E_{b,\tau} = E_b / (1 + \varphi_{b,cr})$  вместо начального модуля упругости  $E_b$ .

По сути, в действующих нормах предполагается, что вся конструктивная схема создана одновременно, а коэффициент ползучести бетона  $\varphi_{b,cr}$  относится к состоянию конструкции, отстоящему по времени очень далеко от момента создания и начала работы конструкции под нагрузкой. Иными словами, нормы ориентируют на исследование системы, в которой процесс ползучести завершен.

В некоторых случаях могут представлять интерес промежуточные во времени состояния системы. Подход к их анализу указан в работах, но и здесь предполагалось одновременное создание всего конструктивного комплекса.

В действительности проявление эффектов ползучести, особенно интенсивное у молодого бетона, начинается у различных элементов

конструктивного комплекса не одновременно, а связано с этапностью возведения конструкции. Здесь мы имеем дело с так называемой ползучестью неоднородно стареющей системы.

Меняющиеся от этапа к этапу соотношения между жесткостями элементов системы приводят к заметному перераспределению внутренних усилий в разновозрастных частях конструкции. Однако, чтобы иметь возможность учесть эти эффекты необходимо знать, как меняются во времени характеристики ползучести.

Одной из наиболее распространенных феноменологических теорий ползучести является теория Маслова-Арутюняна, следуя которой можно представить выражение для меняющейся во времени деформации  $\varepsilon(t)$ , возникающей под действием приложенного в момент времени  $\tau$  и постоянно действующего напряжения  $\sigma$ , как

$$\varepsilon(t) = \sigma \left\{ \frac{1}{E(t)} + C(t, \tau) + \left[ \frac{1}{E(\tau)} - \frac{1}{E(t)} \right] \right\} \quad (1.1)$$

где  $C(t, \tau)$ - так называемая мера ползучести бетона (деформация ползучести, соответствующая единичному напряжению  $\sigma = 1$ ).

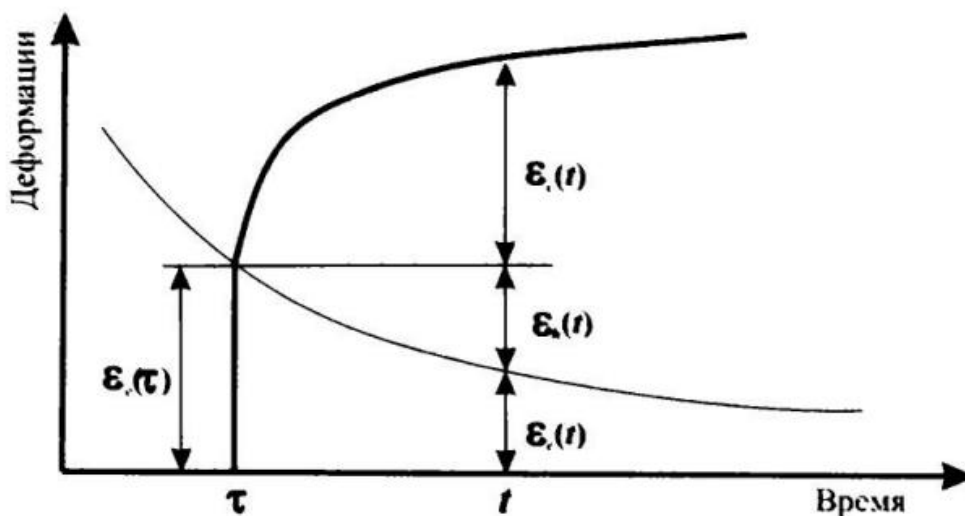
Первое слагаемое в фигурных скобках относится к мгновенно возникающей упругой деформации  $\varepsilon_e$ , второе к деформации ползучести бетона  $\varepsilon_c$ , а третье, названное В.Д. Харлабом [8] деформацией твердения  $\varepsilon_h$ , вызывается изменением модуля упругости бетона с течением времени.

Не трудно видеть, что условный модуль деформаций, с использованием которого  $\varepsilon(t)$  вычисляется линейным расчетом, равен

$$\frac{1}{E_{ec}(t, \tau)} = \frac{1}{E(\tau)} + C(t, \tau) \quad (1.2)$$

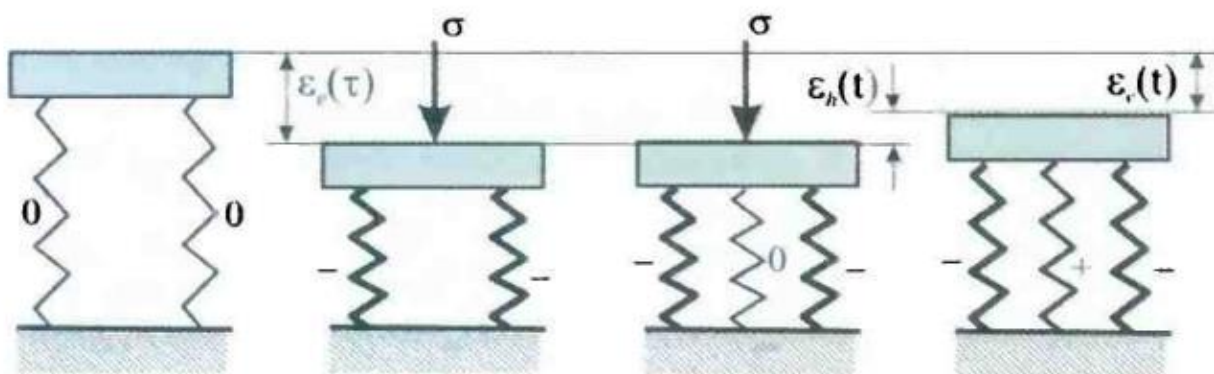
А сам процесс деформирования условно показан на рис 5. В момент приложения нагрузки мгновенно возникает деформация  $\varepsilon_e$ , а далее параллельно развивается нарастание деформации ползучести  $\varepsilon_c$  и часть

мгновенной упругой деформации превращается в необратимую остаточную деформацию твердения  $\epsilon_h$ .



**Рисунок 2. Процесс деформирования**

Соответствующая механическая модель, в которой деформация ползучести не показана, приведена на рис. 6. Увеличение модуля упругости за счет появления новых связей, которые возникают в процессе твердения и не являются напряженными, приводит не к исчезновению упругой деформации, а к превращению ее в остаточную деформацию твердения, которая становится явно видной при разгрузке. Тогда вновь появившиеся связи напрягаются и в конструкции возникает некоторое преднапряжение.



**Рисунок 3. Упругая модель с возрастающим модулем упругости**

По аналогии с отечественными нормативными документами многочисленные факторы, влияющие на ползучесть бетона (тип цемента,

влажность окружающей среды, размеры элемента) более полно учтены в Eurocode 2 [9]. При этом Еврокод оперирует с понятием коэффициента ползучести, который определяет деформацию ползучести между временными точками  $t$  и  $\tau$  по отношению к упругим деформациям. Этот коэффициент связан с мерой ползучести  $C(t, \tau)$  зависимостью:

$$C(t, \tau) = \frac{\varphi(t, \tau)}{E(\tau)} \quad (1.3)$$

В соответствии с [9] ползучесть бетона рассматривается как один из основных факторов, влияющих на длительные деформации и перераспределение усилий в железобетонных конструкциях. Особенно существенное значение ползучесть приобретает для вертикальных несущих элементов — колонн, работающих преимущественно на сжатие и воспринимающих длительные постоянные нагрузки.

Ползучесть бетона учитывается с помощью коэффициента ползучести

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_c(t, t_0) \quad (1.4)$$

Где  $\varphi_0$  - начальный коэффициент ползучести, учитывающий основные параметры бетона и условий эксплуатации.

Начальный коэффициент ползучести определяется выражением:

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) \quad (1.5)$$

Где  $\varphi_{RH}$  - коэффициент, учитывающий относительную влажность окружающей среды;

$f_{cm}$  - средняя прочность бетона на сжатие;

$\beta(t_0)$  - коэффициент, учитывающий возраст бетона при нагружении;

$\beta(f_{cm})$  – коэффициент, учитывающий влияние предела прочности при сжатии бетона на условный коэффициент ползучести.

При расчетах железобетонных элементов при длительном действии внешней нагрузки вопрос определения их напряженно-деформированного состояния с учетом ползучести не имеет окончательного решения. В связи с этим расчет конструкций с учетом длительного деформирования бетона во

времени является актуальной задачей, решение которой имеет практическую значимость для проектирования железобетонных зданий, наиболее распространенных в гражданском строительстве [5,10].

#### **Использованные источники:**

1. Мурашев, В. И. Трещиноустойчивость, жесткость и прочность железобетона / В. И. Мурашев. – М.: Машстройиздат, 1950. – 268 с.
2. Карпенко, Н. И. Общие модели механики железобетона / Н. И. Карпенко. – М.: Стройиздат, 1996. – 413 с.
3. Бондаренко, В. М. Расчетные модели силового сопротивления железобетона / Вл. И. Колчунов, В. М. Бондаренко. – М: Изд-во АСВ, 2004. – 472 с.
4. Залесов, А. С. Учет физической нелинейности при расчете железобетонных монолитных конструкций высотных зданий / А. С. Залесов, Т. А. Мухамедиев, Е. А. Чистяков // Строительная механика и расчёт сооружений. – 2005. – №1 – С. 4–8
5. Androsova N., Kolchunov V. Survivability Exposition of a Long-Term Deformable Reinforced Concrete Building Frame Under Accidental Actions. In: Vatin N., Roshchina S., Serdjuks D. (eds) Proceedings of MPCPE 2021. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 182. Springer, Cham. 2022.
6. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия: актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85\* / Минстрой России. — М.: Минстрой России, 2016. — 168 с.
7. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003.
8. Харлаб В. Д. Деформации твердения бетона и их учет при расчете конструкций. — М.: Стройиздат, 1974.
9. Eurocode 2. EN 1992-1-1:2004. Design of concrete structures. General rules and rules for buildings. — Brussels: CEN.