

Корозников А.Е.,

Студент

2 курс, факультет «Строительство»

Санкт-Петербургский Государственный архитектурно-строительный

университет

Россия, г. Санкт-Петербург

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ УЧЕТА ПОЛЗУЧЕСТИ

***Аннотация:** В данной статье рассматриваются особенности учета коэффициентов ползучести в СП 63.13330.2018 и программном комплексе ЛИРА-САПР по Eurocode 2, Проанализировано напряженно-деформированное состояние колонн и плит перекрытия и проведен сравнительный анализ методик учета ползучести. Результаты исследования показали, что использование методики приведенного модуля деформации по СП 63.13330.2018 менее трудоемко и демонстрирует идентичные показатели для первой группы предельных состояний, что и при нелинейном расчете*

***Ключевые слова:** бетон, арматура, деформации, напряжения, ползучесть, ЛИРА-САПР.*

***Annotation:** This article examines the specifics of accounting for creep factors in SP 63.13330.2018 and the LIRA-SAPR software package according to Eurocode 2. The stress-strain state of columns and floor slabs is analyzed, and a comparative analysis of creep accounting methods is conducted. The results of the study showed that using the reduced deformation modulus method according to SP 63.13330.2018 is less labor-intensive and demonstrates identical indicators for the first group of limit states as in the nonlinear calculation.*

Key words: concrete, reinforcement, deformations, stresses, creep, LIRA-SAP.

Введение.

Расчет высотных зданий по 1-й и 2-й группам предельным состояниям следует выполнять на наиболее неблагоприятные сочетания одновременного действия нагрузок разной степени длительности. Эксплуатационные свойства бетона, такие как ползучесть, существенно влияют на долговечность и надежность конструкций. При длительном воздействии постоянной нагрузки деформации бетона нарастают во времени - бетон проявляет свойство «текучести», или ползучести. Это явление объясняется свойствами цементного теста, представляющего собой на ранних стадиях студнеобразную аморфную массу (гель), в которой впоследствии развиваются кристаллические образования. С потерей влаги и переходом в кристаллическое состояние интенсивность деформаций снижается, ввиду чего необходимо учитывать реологические свойства бетона.

На ползучесть бетона влияют:

- Состав бетона: повышение водоцементного отношения (В/Ц) ведет к росту ползучести.
- Возраст бетона: на ранних стадиях твердения бетоны демонстрируют более высокую податливость.
- Условия среды: высокая влажность способствует снижению интенсивности процесса.

Описание расчетной схемы здания.

Рассмотрим влияние ползучести по СП 63.13330.2018 [1] и Eurocode 2 [2] на упрощенной модели здания. Трехэтажное строение состоит из:

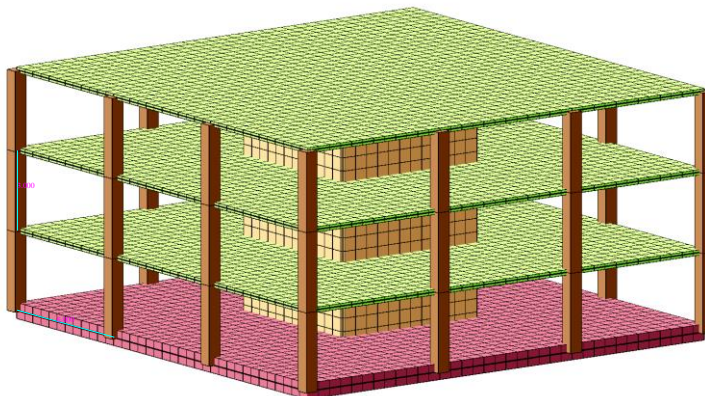
- колонн сечением 500x500 мм;
- стен толщиной 200 мм;

- фундаментной плиты 600 мм;
- плит перекрытия 200 мм

Конструкции смоделированы из бетона класса прочности В30.

Шаг колонн 6 метров, высота этажа 3 метра, стены составляют центральное ядро.

Слайд 1



3D

Рисунок 1. Общий вид здания

Методы учета ползучести бетона в СП 63.13330.2018

Методы учета ползучести в российских и европейских нормативных документах глобально различаются. В основном нормативном документе Российской Федерации по бетону и железобетону СП 63.13330.2018 [1]. Для оценки влияния процессов ползучести в рамках расчетной модели в программном комплексе ЛИРА-САПР допустимо применить метод приведенных жесткостей в линейной постановке. Данный подход обеспечивает понятную логику действий для учета ползучести.

$$E_{b,t} = \frac{E_b}{1 + \varphi_{b,cr}} \quad (1)$$

где E_b – значения начального модуля упругости бетона при сжатии и растяжении, принимаемый в зависимости от класса бетона по прочности на сжатие согласно таблице 6.11 [1].

$\varphi_{b,cr}$ – коэффициент ползучести бетона, принимаемый при продолжительном действии нагрузки согласно таблице 6.12 [1] в зависимости

от класса бетона на сжатие и относительной влажности воздуха окружающей среды

Для учета коэффициентов ползучести по СП 63.13330.2018 обратимся к пункту 6 и таблице 6.12. Согласно [1] для бетона класса В30 и относительной влажности воздуха окружающей среды 40-75% коэффициент ползучести равен 2,3.

Вертикальные элементы:

$$E_{b,t} = \frac{32,5 \cdot 10^3}{1 + 2,3} = 9848,5 \text{ МПа}$$

Для изгибаемых горизонтальных элементов (плит перекрытий) доминирующим фактором потери жесткости является образование трещин в растянутой зоне. Для сохранения физически достоверного соотношения жесткостей между сжатыми и изгибаемыми элементами пространственной системы, модуль деформации бетона горизонтальных конструкций назначается с учетом понижающего коэффициента 0,2 (для длительного действия нагрузок) в соответствии с требованиями п. 6.2.8 СП 430.1325800.2018 [3].

Горизонтальные элементы:

$$E_1 = E_b \cdot 0,2, \quad (2)$$

$$E_1 = 32,5 \cdot 10^3 \cdot 0,2 = 6,5 \cdot 10^3 \text{ МПа}$$

где $E_b = 32,5 \cdot 10^3$ МПа – значение модуля упругости бетона при сжатии и растяжении принятый по [1] табл. 6.11

Реализованный дифференцированный подход к назначению жесткостных характеристик элементов, опирающийся на действующие нормы РФ и позволяющий аналитически перевести систему из начального (упругого) состояния в конечное (длительное) на основе нормативных методик. Применение дифференцированного метода приведенных жесткостей позволяет разорвать итерационную петлю «усилия-армирование-жесткость», характерную для нелинейных расчетов, и с достаточной инженерной

точностью выполнить сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния каркаса при разных классах бетона.

Модели учета ползучести в ПК ЛИРА-САПР по Eurocode 2

Одна из основных программ для расчета зданий в России — это ПК ЛИРА-САПР. В данном программном комплексе разработчиками заложено 3 варианта учета ползучести.

1) 41 – Степенной закон ползучести (EuroCode prEN 1992-1-1)

Задаются значения для следующих параметров:

– теоретический коэффициент ползучести (во сколько раз увеличивается деформация за бесконечное время действия нагрузки) φ_0 ;

– коэффициент, зависящий от относительной влажности и теоретического размера элемента β_H .

Коэффициент ползучести, учитываемый в расчете, определяется по формуле:

$$\varphi(T) = \varphi_0 \left(\frac{T}{T + \beta_H} \right)^{0.3} \quad (3)$$

где T – количество суток (возраст бетона), по прошествии которых требуется учесть влияние ползучести (задается в поле

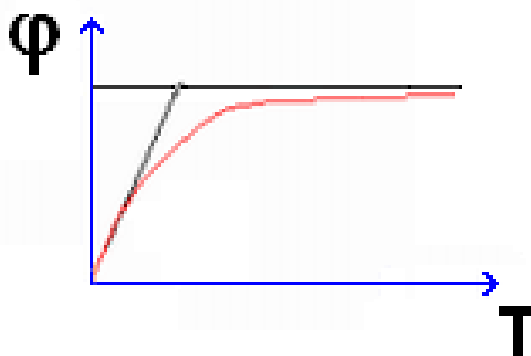


Рисунок 2. График зависимости коэффициента ползучести φ , соответствующий количеству суток T , от времени T

2) 44 – Кусочно-линейный закон ползучести

Задаются пары значений для следующих параметров:

- количество суток (возраст бетона) T ;
- коэффициент ползучести $\varphi(T)$, соответствующий количеству суток T .

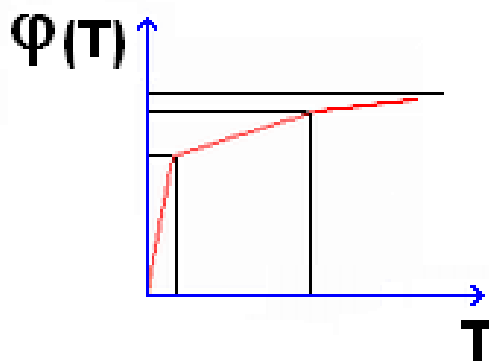


Рисунок 3. График зависимости коэффициента ползучести $\varphi(T)$, соответствующий количеству суток T , от времени T

3) 54 – Кусочно-линейный закон термоползучести

задаются пары значений для следующих параметров:

- количество суток (возраст бетона) T ;
- температура окружающей среды конструкции $t(T)$, °С, соответствующая количеству суток T .

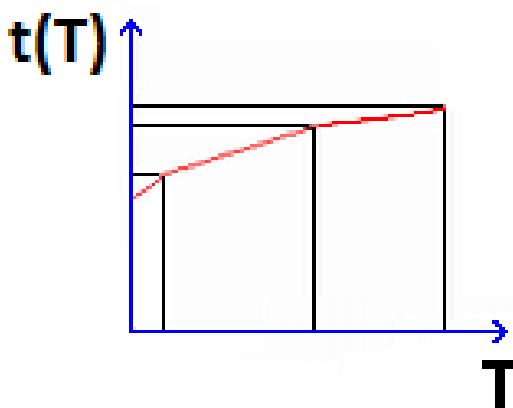


Рисунок 4. График зависимости температуры среды $t(T)$, соответствующий количеству суток T , от времени T

Ползучесть под влиянием температуры чаще всего проявляется в конструкциях с большим пролётом (мосты, арки, оболочки).

Наиболее подходящим из заложенных в программный комплекс методов является 41 – степенной закон ползучести – данная методика представлена в Eurocode 2. [2] В соответствии с [2] условный коэффициент ползучести определяется по формуле (4):

$$\varphi(T) = \varphi_0 \left(\frac{T}{T + \beta_H} \right)^{0.3},$$

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) \quad (4)$$

где φ_{RH} - коэффициент, учитывающий влияние относительной влажности воздуха на условный коэффициент ползучести:

$$\varphi_{RH} = 1 + \frac{1 - \frac{RH}{100}}{0,1 \sqrt[3]{h_0}} \text{ для } f_{cm} \leq 35 \text{ МПа}, \quad (5)$$

$$\varphi_{RH} = \left[1 + \frac{1 - \frac{RH}{100}}{0,1 \sqrt[3]{h_0}} \cdot \alpha_1 \right] \cdot \alpha_2 \text{ для } f_{cm} > 35 \text{ МПа}, \quad (6)$$

RH - относительная влажность воздуха окружающей среды, %;

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

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}}, \quad (7)$$

f_{cm} — средняя прочность при сжатии бетона, МПа, в возрасте 28 сут, равный 68 для бетона В60;

$\beta(t_0)$ — коэффициент, учитывающий влияние возраста бетона при начале нагружения на условный коэффициент ползучести:

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0,1 + t_0^{0,20}}, \quad (8)$$

h_0 — условный приведенный размер элемента, мм:

$$h_0 = \frac{2A_c}{u}, \quad (9)$$

где A_c — общая площадь поперечного сечения бетона;

u — периметр элемента, контактирующий с атмосферой;

β_H — коэффициент, учитывающий относительную влажность воздуха (RH , %) и условный размер элемента (h_0 , мм) и определяемый по формуле:

$$\beta_H = 1,5[1 + (0,012RH)^{18}] \cdot h_0 + 250 \leq 1500 \text{ для } f_{cm} \leq 35 \text{ МПа}, \quad (10)$$

$$\beta_H = 1,5[1 + (0,012RH)^{18}] \cdot h_0 + 250\alpha_3 \leq 1500\alpha_3 \text{ для } f_{cm} > 35 \text{ МПа}, \quad (11)$$

$\alpha_{1/2/3}$ — коэффициенты для учета влияния прочности бетона:

$$\alpha_1 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,7}; \quad \alpha_2 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,2}; \quad \alpha_3 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,5} \quad (12)$$

Для задания диаграмм состояния бетона и арматуры использовался 14 – кусочно-линейный закон деформирования. Прочностные и деформационные характеристики были назначены в соответствии с [1]. Степенной закон ползучести бетона задавался по характеристикам [2]. Для анализа изменения параметров НДС элементов влияние ползучести в расчете учитывалось по истечении 1000 суток после приложения нагрузки.

Рассмотрим расчет коэффициентов ползучести для колонны 500x500

Условный коэффициент ползучести равен:

$$\varphi_0(1000) = 1,7208 \cdot 2,725 \cdot 0,245 = 1,1491$$

Коэффициент, учитывающий влияние относительной влажности воздуха на условный коэффициент ползучести:

$$\varphi_{RH} = \left[1 + \frac{1 - \frac{50}{100}}{0,1\sqrt[3]{250}} \cdot 0,9440 \right] \cdot 0,9837 = 1,7208$$

Коэффициент, учитывающий влияние предела прочности при сжатии бетона на условный коэффициент ползучести:

$$\beta(38) = \frac{16,8}{\sqrt{38}} = 2,725$$

Коэффициент, учитывающий влияние возраста бетона при начале нагружения на условный коэффициент ползучести:

$$\beta(1000) = \frac{1}{0,1 + 1000^{0,20}} = 0,245$$

Условный приведенный размер элемента, мм:

$$h_0 = \frac{2 \cdot 500 \cdot 500}{2000} = 250 \text{ мм}$$

Коэффициент, учитывающий относительную влажность воздуха:

$$\beta_H = 1,5[1 + (0,012 \cdot 50)^{18}] \cdot 250 + 250 \cdot 0,9597 \leq 1500 \cdot 0,9597 \\ 614,967 \leq 1439,572$$

Коэффициенты для учета влияния прочности бетона:

$$\alpha_1 = \left[\frac{35}{38} \right]^{0,7} = 0,9440;$$

$$\alpha_2 = \left[\frac{35}{38} \right]^{0,2} = 0,9837;$$

$$\alpha_3 = \left[\frac{35}{38} \right]^{0,5} = 0,9597$$

Коэффициент ползучести, учитываемый в расчете:

$$\varphi(1000) = 1,1491 \cdot \left(\frac{1000}{1000 + 614,967} \right)^{0,3} = 0,9952$$

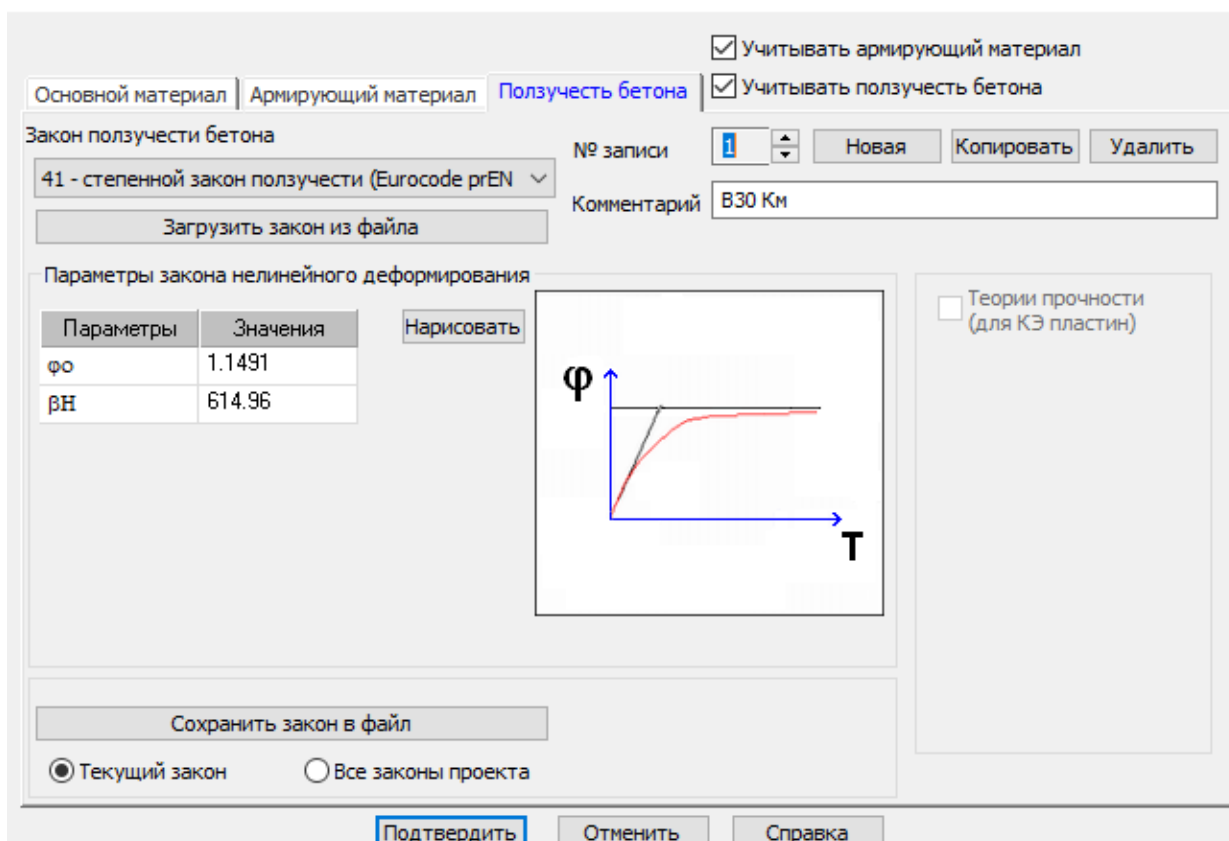


Рисунок 5. 41 степенной закон ползучести, принятый для колонны 500x500 из бетона В30

Коэффициенты ползучести для остальных конструкций здания см. таблицу 1.

Таблица 1.

Коэффициент ползучести по Eurocode 2

Конструкция	f_{cm} , МПа	φ_{RH}	$\beta(f_{cm})$	φ_0
Фундаментная плита	38	1,6275	2,725	1,0870
Стены	38	1,8274	2,725	1,2203
Колонны	38	1,7208	2,725	1,1491
Плиты перекрытия	38	1,8274	2,725	1,2203

Результаты исследования и их анализ.

Результаты расчетов сведены в таблицу 2.

Таблица 2.

Напряженно-деформированное состояние элементов трехэтажного строения

Параметр	Учет ползучести по [1]	Учет ползучести по [3]
Продольное усилие в торцевой колонне, кН	-516,311	-497,500
Укорочение/удлинение торцевой колонны, мм	-0,331	0,362
Продольное усилие в угловой колонне, кН	-263,290	-259,312
Укорочение/удлинение угловой колонны, мм	-0,350	0,357
Изгибающий момент в плите перекрытия первого этажа, в середине пролета, кНм/м	$M_x = 24,338$ $M_y = -4,544$	$M_x = 24,450$ $M_y = -4,276$
Изгибающий момент в плите перекрытия первого этажа, в опорной зоне, кНм/м	$M_x = -47,651$ $M_y = -51,397$	$M_x = -47,466$ $M_y = -47,849$
Прогиб плиты перекрытия 1 этажа	-25,462	-0,012

На основании приведенных значений в таблице 2 можно сделать вывод, что усилия при учете ползучести по российским нормативным документам немного выше (в данном конкретном случае 3%), что дает небольшой запас прочности в сравнении с методом, заложенным в ПК ЛИРА-САПР по Eurocode

2, при этом разница небольшая и считаю результаты по усилиям идентичными, как для изгибаемых, так и для сжатых элементов.

Для вертикальных конструкций увеличены деформации, что говорит нам о более точном подходе при использовании нелинейного расчета, но это доли миллиметра, разница между которыми для торцевой колонны 8%, и для угловой 2%.

То есть применение дифференцированного метода корректно отражает перераспределение продольных усилий и фиксирует итоговую разность деформаций вертикальных элементов в период эксплуатации здания.

Деформации в горизонтальных конструкциях сведены к минимуму за счет нелинейного расчета, то есть приведения расчетной модели к состоянию близкому к реальной работе конструкции в последующем.

Стоит учесть трудозатраты для учета нелинейной работы материалов, при моделировании нелинейного расчета необходимо: выполнить армирования элементов в программном комплексе (назначение ТЗА), параметризация нелинейной работы бетона, арматуры (дополнительный расчет коэффициентов по [1]), вычисление коэффициента ползучести по [2], параметризация нелинейного расчет – задание шагов, переключение дополнительных нагрузок. Все это доказывает, что методика, заложенная в ПК – ЛИРА САПР более трудоемкая и увеличивает продолжительность, как параметризации расчетной схемы, так и ее последующего машинного расчета, но в итоге результаты для первой группы предельных состояний идентичны. Таким образом при необходимости учета ползучести бетона, допустимо использовать метод приведенных жесткостей, заложенный в СП 63.13330.2018 несмотря на иной подход программного комплекса.

Использованные источники:

1. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003.

2. Eurocode 2. EN 1992-1-1:2004. Design of concrete structures. General rules and rules for buildings. — Brussels: CEN.

3. СП 430.1325800.2018 Монолитные конструктивные системы. Правила проектирования.