

**УЧЕТ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БЕТОНА ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ
МОНОЛИТНЫХ МНОГОЭТАЖНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ РАМ
С УСКОРЕНИЕМ СРОКОВ СТРОИТЕЛЬСТВА**

А. И. Шеин*, О. Б. Завьялова**

**Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства, г. Пенза (Россия)*

***Астраханский инженерно-строительный институт,
г. Астрахань (Россия)*

Целью настоящей работы является исследование влияния истории нагружения железобетонной монолитной рамы на напряженно-деформированное состояние ее элементов. В расчет приняты последова-

тельность возведения здания и одновременный учет твердения и ползучести бетона, являющиеся функциями времени.

При расчете монолитных систем с растущей расчетной схемой (а скорость строительства достигает порой 3...5 дней на этаж), возводимых из материала, обладающего сложными реологическими свойствами, к которым можно отнести старение, изменение мгновенного модуля упругости, релаксацию напряжений, вызванную деформациями ползучести, целесообразно использовать численный анализ. Применяемые в настоящий момент программные комплексы (ANSYS, NASTRAN и др.), реализующие метод конечных элементов, позволяют вводить в расчет ползучесть материалов (модель Кельвина – Фойгта, Максвелла), которые больше подходят для полимеров, но не для стареющих материалов, каковым является бетон. В настоящей работе предлагается реализация расчета по методу сеточной аппроксимации элементов (МСАЭ). Преимущество метода сеток – возможность одновременного учета полной геометрии армирования сечений элементов, геометрической нелинейности (расчет по деформированному состоянию), физической нелинейности материала конструкции, трещинообразования и ползучести бетона в железобетонных конструкциях с учетом фактора времени, учета истории нагружения сборных и монолитных рамных и пластинчато-стержневых систем, а также отсутствие необходимости сведения нагрузок в узлы. Кроме того, всегда желательно иметь альтернативный метод расчета, основанный на другой концепции, чтобы сравнить полученные результаты для повышения их надежности.

Авторами разработан алгоритм расчета железобетонных рамных каркасов монолитных зданий с учетом ползучести бетона и изменения его модуля мгновенной упругости. Алгоритм базируется на методе сеточной аппроксимации элементов с введенным фактором времени, что позволяет кроме геометрической и физической нелинейности учитывать ползучесть бетона и последовательность возведения монолитного каркаса. Ниже приведены примеры реализации алгоритма в программе «МСАЭ – возведение и ползучесть». Метод сеточной аппроксимации элементов (МСАЭ) позволяет вводить в уравнения интегральные и дифференциальные зависимости для описания свойств материалов, а также учитывать геометрическую нелинейность. В предлагаемой программе для расчета регулярной рамы имеется возможность задавать число учитываемых в расчете промежуточных сечений (8; 16; 32; 64 и т. д.) стержневого элемента. Система нелинейных уравнений включает в себя: уравнения граничных условий (опоры); уравнения равновесия узлов; уравнения совместности деформаций в узлах; уравнения равновесия внешних и внутренних сил в заданных поперечных сечениях, учитывающие продольные и поперечные деформации элементов и представляющие собой дифференциальные уравнения первого и второго порядков. Для приведения системы дифференциальных уравнений к алгебраическому виду используется конечно-разностная аппроксимация. Си-

система нелинейных уравнений решается методом касательных Ньютона, с использованием невырожденной матрицы Якоби и организацией пошаговых итераций. В качестве критерия сходимости расчета принята заданная норма расхождения перемещений в последовательных итерациях. Достоверность результатов расчета по программе «МСАЭ – возведение и ползучесть» подтверждается совпадением результатов расчета на простых тестовых примерах, для которых имеется точное решение, и непротиворечивостью результатов расчета для сложных примеров.

Изменение модуля упругости бетона в процессе твердения принято по экспоненциальной зависимости [1]:

$$E_b(t) = E_0 \cdot (1 - e^{-at}). \quad (1)$$

Учет ползучести бетона осуществляется при помощи коэффициентов $B_z(t_1, t)$, полученных на основе зависимостей для сжатия и для изгиба [1]. Следует отметить, что в методике [1] подобные коэффициенты используются для уточнения величины напряжений в бетоне и арматуре, для чего упругомгновенные напряжения, вычисленные обычным образом, умножаются на эти коэффициенты. В нашей работе на основании формулы

$$B_z \sigma_b = B_z (E_b \cdot \varepsilon) = (B_z E_b) \cdot \varepsilon, \quad (2)$$

учет ползучести и твердения бетона возможно производить на каждом этапе нагружения, путем умножения модуля упругости бетона в соответствующем возрасте $E_b(t)$ на коэффициент $B_z(t_1; t)$:

$$B_z(t_1, t) = 1 - \frac{\gamma \mu E_s n_0 \varphi(t_1)}{1 + \mu n_0 m(t_1)} \int_{t_1}^t e^{-\int_{t_1}^{\tau} \left(\gamma + \frac{\gamma \mu E_s n_0 \varphi(u)}{1 + n_0 \mu m(u)} + \frac{\mu n_0 m'(u)}{1 + \mu m(u)} \right) du} d\tau. \quad (3)$$

В приведенных выражениях: t_1 – возраст бетона в момент нагружения, t – возраст к моменту наблюдения; μ – коэффициент армирования поперечного сечения; $\varphi(t) = C_0 + A_1/t$ – функция для учета меры ползучести; C_0 – предельное значение меры ползучести для материала; A_1, γ, α – постоянные параметры меры ползучести; $m(t) = E_s/E_b(t)$ – отношение модулей упругости арматуры и бетона (в возрасте бетона t -дней); n_0 – коэффициент, учитываемый при изгибе ($z = 1$) и при растяжении-сжатии ($z = 2$):

$$n_0 = \begin{cases} 1 + h_s^2 \cdot A_b / I_b, & \text{при } z = 1; \\ 1, & \text{при } z = 2. \end{cases}$$

Коэффициент B_1 учитывает изгиб, B_2 – растяжение и сжатие.

Графики модуля упругости бетона в зависимости от возраста бетона к моменту нагружения (указан цифрами от 9 до 100 суток) и с учетом коэффициентов ползучести приведены на рис. 1.

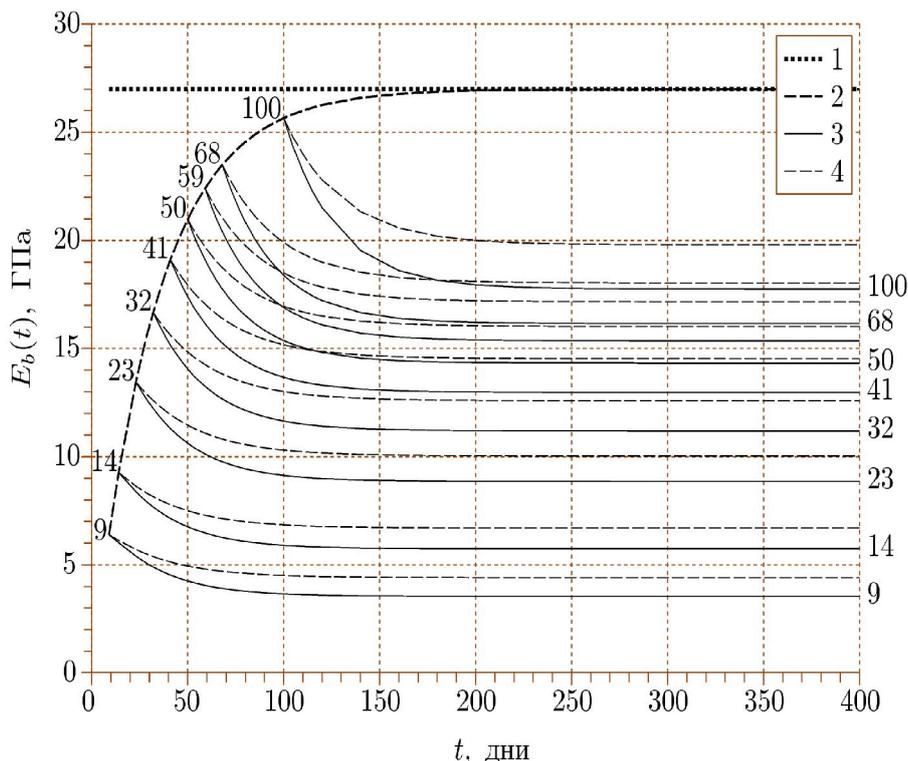


Рис. 1. Модуль упругости бетона E_b : 1 – начальный модуль;

2 – с учетом твердения: $E_b(t) = E_0 \cdot (1 - e^{-at})$;

3 – при изгибе с учетом ползучести: $E_{b1}(t_1; t) = E_{b0}(t_1) \cdot B_1(t_1; t)$;

4 – при растяжении-сжатии с учетом ползучести: $E_{b2}(t_1; t) = E_{b0}(t_1) \cdot B_2(t_1; t)$

Для учета физической нелинейности работы бетона примем аппроксимирующую зависимость $\sigma - \varepsilon$, предложенную П. А. Лукашем [4]. Эта зависимость дает хорошее приближение к действительной диаграмме работы бетона при ограничении области определения от $[\varepsilon^+] \leq 0,0002$, так как имеет и восходящую, и нисходящую ветви, описывающие растянутую и сжатую зоны бетона:

$$\sigma_b = E_b \varepsilon - A_3 \varepsilon^3, \quad (4)$$

Это выражение модернизируем для учета фактора времени к виду:

$$\sigma_b(t) = E_b(t) \varepsilon - A_3(t) \varepsilon^3; \quad (5)$$

$$A_3(t) = \frac{4}{27} \frac{E_b^3(t)}{R_b^2(t)}. \quad (6)$$

Здесь $E_b(t)$ – текущий начальный модуль упругости материала, вычисляемый по формуле (1); $R_b(t)$ – временное сопротивление бетона текущего возраста, определяемое по известной логарифмической зависимости $R_b(t) = 0,7 R_b \lg t$.

Одновременный учет физической нелинейности работы бетона и явления ползучести приводит к тому, что модуль упругости бетона является

функцией двух переменных – возраста бетона при нагружении (t_1) и текущего момента времени t , т.е. $E_b = E_b(t_1; t)$. Кроме того, в этом случае A_3 , участвующее в уравнении моментов, и A_3 , используемое в уравнении продольных сил, будут отличаться.

Жесткость поперечного сечения при изгибе с учетом деформаций, возникающих в арматуре от изгибающего момента и продольной силы, вычисляется по выражению:

$$EI(t_1; t) = E_{b1}(t_1; t) \cdot I_b - A_3(t_1) \cdot (v'')^2 \frac{bh^5}{80} + E_s I_s + \sum E_s A_{sj} y_{sj} \frac{u'}{v''}. \quad (7)$$

Жесткость при растяжении-сжатии с учетом деформаций, возникающих в арматуре от продольной силы и изгибающего момента, определяется по формуле:

$$EA(t_1; t) = E_{b2}(t_1; t) \cdot A_b - A_b A_3(t_1) \cdot (u')^2 + E_s A_s + \sum E_s A_{sj} y_{sj} \frac{v''}{u'}. \quad (8)$$

Для расчета принята рама со следующими характеристиками: пролет рамы – 6 м, число пролетов – 1, высота этажа – 6 м, колонны сечением 60 x 40 см, армирование симметричное: $A_s = 42,39 \text{ см}^2$, $h_s = 17 \text{ см}$; ригели 30 x 60 см, армирование симметричное, $A_s = 42,39 \text{ см}^2$, $h_s = 27 \text{ см}$. Бетон класса В-20, нормативный модуль упругости бетона $E_0 = 27 \text{ ГПа}$, модуль упругости арматуры $E_s = 200 \text{ ГПа}$. Этапы проведения монолитных работ приняты 9 суток на один этаж.

Оценим изменение напряженно-деформированного состояния колонны и ригеля первого этажа с учетом истории нагружения.

Нагружение ригеля первого этажа было принято следующими этапами (с интервалами в один месяц):

- в возрасте 23 дня (снятие временных опор) нагрузка $q_1 = 30 \text{ кН/м}$ – собственный вес перекрытия первого этажа;
- в возрасте 53 дня добавлено $q_2 = 30 \text{ кН/м}$;
- в возрасте 83 дня приложено $q_3 = 30 \text{ кН/м}$;
- в возрасте 113 дней добавлено $q_4 = 30 \text{ кН/м}$.

На каждом этапе были вычислены упруго-мгновенные напряжения в бетоне сжатой зоны с учетом действительного значения модуля упругости бетона. Затем использованы зависимости Н. Х. Арутюняна для учета твердения и ползучести бетона. На рис. 2 показано изменение напряжений в бетоне сжатой зоны в среднем сечении ригеля первого этажа.

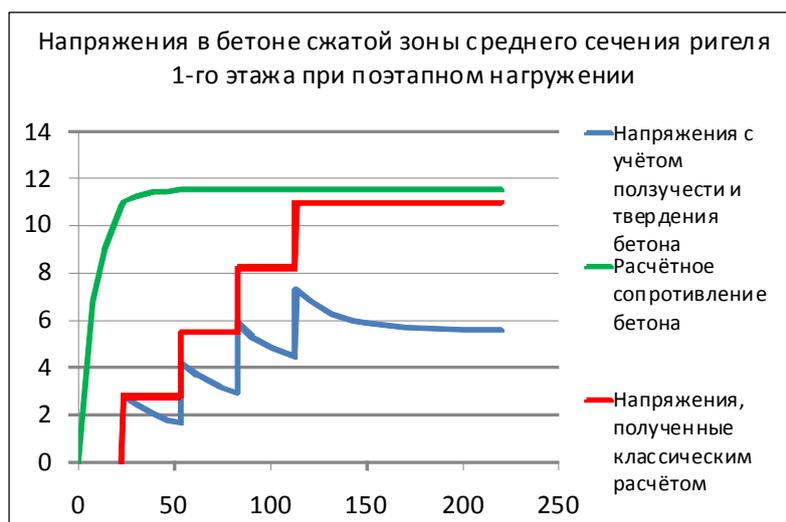


Рис. 2. Диаграмма напряжений в бетоне сжатой зоны среднего сечения ригеля 1-го этажа при поэтапном нагружении (МПа)

Из рис. 2 видно, что напряжения, полученные классическим расчетом, на четвертом этапе нагружения приближаются к расчетному сопротивлению бетона при сжатии. Расчет с учетом твердения и ползучести бетона показывает, что действительные напряжения в бетоне сжатой зоны на всех этапах нагружения намного ниже. Быстронатекающая ползучесть и связанная с ней релаксация напряжений в бетоне проявляется примерно в течение 30 суток от момента приложения нагрузок очередного этапа. Постепенное приложение нагрузки малыми порциями, как это обычно и происходит в процессе строительства, позволит избежать «пиков» на эпюре $\sigma(t)$. В рассмотренной раме установившиеся по истечении 200 суток нормальные напряжения в бетоне ригеля первого этажа составляют 50 % от его расчетного сопротивления. Очевидно, что ускорение сроков строительства монолитных железобетонных каркасов при учете действительной работы бетона не вызывает опасений со стороны напряжений в бетоне, но при этом следует иметь в виду значительный рост не учтенных напряжений в арматуре элементов каркаса (рис. 3, 4).

В рассматриваемом примере превышение действительных напряжений в арматуре ригеля составило 1,7 раза, в арматуре колонны – 2,6 раза. При этом следует отметить, что только за счет использования формулы (1) для учета реального модуля упругости бетона, дополнительный прирост упруго-мгновенных напряжений в арматуре составил порядка 20 % по сравнению с вычисленными классическим расчетом, т. е. при нормативной величине E_b . Выявить реальное распределение напряжений в материале конструкций в соответствии с календарным планом производства работ, и возможно, скорректировать этот план, поможет предлагаемая методика расчета, реализованная в методе сеточной аппроксимации элементов.

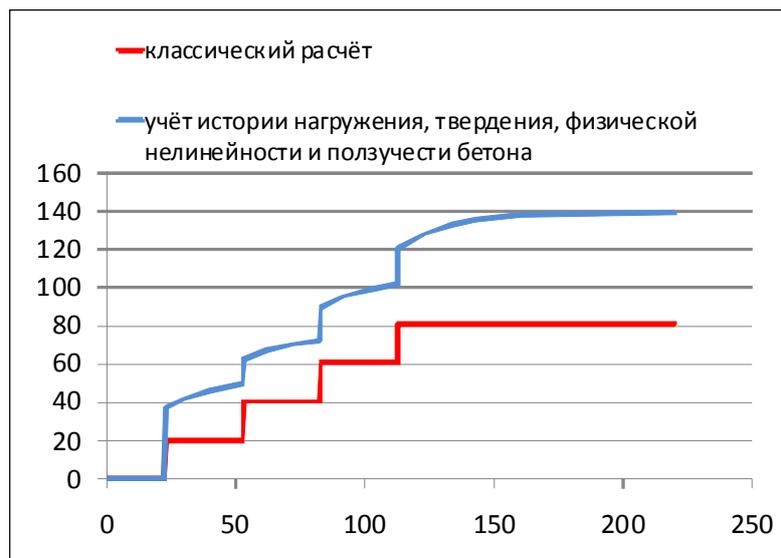


Рис. 3. Напряжения (МПа) в арматуре среднего сечения ригеля 1-го этажа при поэтапном нагружении с учетом действительной работы бетона

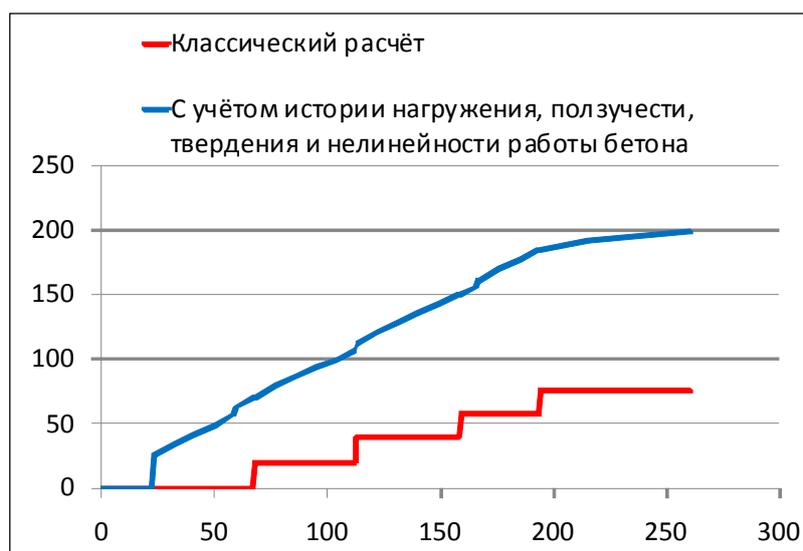


Рис. 4. Напряжения (МПа) в сжатой арматуре колонны 1-го этажа (верхнее сечение) при поэтапном нагружении с учетом действительной работы бетона

Выводы:

1. Учет истории нагружения монолитных железобетонных сооружений, особенно возводимых в короткие сроки, показывает снижение ресурса конструктивной безопасности этих зданий.
2. Предложенная методика учета поэтапного нагружения позволяет выявить величину дополнительных напряжений в арматуре наиболее ответственных элементов конструкций;
3. Увеличение напряжений в рассматриваемых примерах только от учтенной части постоянной нагрузки составило от 50 до 70 МПа, что

для арматуры класса А-III соответствует 15...20 % ее расчетного сопротивления.

4. Активный рост напряжений в арматуре, вызванный ползучестью бетона, проявляется до возраста бетона 270–290 суток, что особенно следует учитывать при определении напряженно-деформируемого состояния многоэтажных монолитных конструкций;

5. Учет реальной работы материалов строительных конструкций, особенно бетона, позволяет выявить ресурс конструктивной безопасности уже построенных зданий и сооружений и уточнить реальное распределение внутренних усилий и связанных с ними деформаций во вновь проектируемых.

Список литературы

1. Арутюнян, Н. Х. Некоторые вопросы теории ползучести / Н. Х. Арутюнян. – М. : Гостехиздат, 1952. – 323 с.

2. Шеин, А. И. Метод сеточной аппроксимации элементов в задачах строительной механики нелинейных стержневых систем / А. И. Шеин. – Пенза : ПГУАС, 2005. – 248 с.

3. Завьялова, О. Б. Учет последовательности монтажа конструкций при расчете усилий в рамных системах / О. Б. Завьялова // Известия вузов. Строительство. – 2009. – № 2. – С. 115–122.

4. Лукаш, П. А. Основы нелинейной строительной механики / П. А. Лукаш. – М. : Стройиздат, 1978. – 208 с.

5. Завьялова, О. Б. Учет истории нагружения монолитных железобетонных плитно-стержневых систем при определении напряженного состояния их элементов / О. Б. Завьялова // Промышленное и гражданское строительство. – 2012. – № 7. – С. 58–61.