

6. Золина Т. В., Садчиков П. Н. Методика оценки остаточного ресурса эксплуатации промышленного здания, оснащенного мостовыми кранами // Вестник ВолгГАСУ. Сер. Строительство и архитектура. 2013. № 32 (51).

7. Золина Т. В., Садчиков П. Н. Моделирование работы конструкций промышленного здания с учетом изменения жесткости в процессе эксплуатации // Вестник МГСУ. 2012. № 10. С. 120–124.

8. Пшеничкин А. П., Пшеничкина В. А. Надежность зданий и оснований в особых условиях : учеб. пособие / Волгогр. гос. архит.-строит. ун-т. – Волгоград : ВолгГАСУ, 2009. 218 с.

9. Золина Т. В., Садчиков П. Н. Автоматизированная система расчета промышленного здания на крановые и сейсмические нагрузки // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 8. С. 14–16.

10. Динамический расчет зданий и сооружений / М. Ф. Барштейн, В. А. Ильичев, Б. Г. Коренев и др. ; под ред. Б. Г. Коренева, И. М. Рабиновича. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Стройиздат, 1984. 303 с. (Справочник проектировщика).

УДК 624.042

УЧЕТ ПОЛЗУЧЕСТИ И СТАРЕНИЯ БЕТОНА В СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКЕ НАРАЩИВАЕМЫХ ТЕЛ (ОБЗОР)

О. Б. Завьялова

Астраханский инженерно-строительный институт (Россия)

Рассмотрены литературные источники, включая историю вопроса и современное состояние проблемы учета сложных реологических свойств бетона, таких как ползучесть, старение, физическая нелинейность. Особое внимание уделено учету истории возведения быстровозводимых конструкций из монолитного железобетона с введением в расчет фактора времени.

Ключевые слова: железобетон, арматура, ползучесть, напряжения.

It was considered the literature sources, including the background and current state of the problem of accounting for complex rheological properties of concrete, such as creep, aging, physical nonlinearity. Special attention is paid to the history of the erection of prefabricated constructions made of reinforced concrete with the factor of time.

Keywords: concrete, iron armature, creep, voltage.

Расчету наращиваемых систем в последнее время уделяется большое внимание. Опция активации и деактивации элемента доступна пользователю в большинстве отечественных и зарубежных программных комплексов (SCAD, ANSYS и др.). Среди недавних работ на эту тему можно назвать исследования А. И. Сапожникова и С. М. Григоршева [1], О. В. Кабанцева и А. В. Карлина [2], О. Б. Завьяловой [3], выполненные для сборных конструкций с поэтажным формированием расчетной схемы. Однако расчет монолитного железобетона, особенно возводимого в короткие сроки, требует учета сложных реологических свойств бетона: старения, ползучести, изменения мгновенно-упругого модуля деформации.

Современная теория ползучести бетона базируется на многочисленных экспериментальных данных и является, по существу, феноменологической теорией. Экспериментальные основы этой теории были заложены Дэвисом, Дютроном, Шенком, Глэнвиллем и др. Теоретические основы были развиты в многочисленных трудах ученых на советском и постсоветском пространстве, начиная со второй половины XX века. Наиболее значительные работы в области теории упругости принадлежат Н. Х. Арутюняну, С. В. Александровскому, В. М. Бондаренко, Н. А. Буданову, А. А. Гвоздеву, П. И. Васильеву, И. И. Гольденблату, Я. Д. Лившицу, Г. Н. Маслову, Ю. Н. Работнову, А. Р. Ржаницыну, И. Е. Прокоповичу, И. И. Улицкому, С. В. Бондаренко, А. Д. Беглову, Р. С. Санжаровскому, В. Д. Харлабу и многим другим ученым.

В монографии А. Р. Ржаницына по теории ползучести [4] получены интегральные уравнения метода сил для системы общего вида, и показано, что если элементы системы изготовлены из одного материала, то задача может быть сведена к расчету упругой системы на дополнительные внешние фиктивные воздействия.

В книге Н. Х. Арутюняна, А. А. Зевина [5] приведены методы расчета сплошных тел различного очертания, а также элементов армированных стержневых систем на примере колонны с учетом линейной ползучести и старения материала. Рассмотрены задачи оптимизации.

Большой практический интерес представляет задача учета ползучести и старения бетона в наращиваемых стержневых системах, элементы которых имеют разный возраст, и, вследствие этого, разные характеристики материала.

По-видимому, впервые задача определения напряженно-деформированного состояния растущего тела, а именно непрерывно наращиваемого упругого клина, была поставлена в работе Э. И. Рашбы [6].

Начиная с 80-х гг. прошлого столетия, все чаще поднимаются проблемы обеспечения прочности и устойчивости объектов строительства в процессе возведения. В частности, в работе Н. S. Lew [7] указывается на необходимость учета технологии возведения (последовательности монтажа сборной несущей конструкции, бетонирования монолитных блоков) при проектировании многоэтажных зданий. Иными словами, классический расчет готовых строительных конструкций под действием эксплуатационных нагрузок должен быть дополнен расчетами под действием технологических воздействий на промежуточных стадиях в процессе возведения [8].

Решению задач наращиваемых тел с применением теории вязко-упругости посвящены работы И. И. Воровича, Л. П. Лебедева, М. В. Сергеева, Т. Г. Роджерса и Е. Х. Ли [9], М. Шиоцуки [10], Ф. Солимана [11] и многих других исследователей в нашей стране и за рубежом.

В. Д. Харлаб получил интегральные уравнения метода сил с учетом ползучести для систем, состоящих из несимметрично армированных железобетонных элементов, а также рассматривал применение линейной теории ползучести к расчету наращиваемого тела [12, 13].

В работе В. А. Бовина, Е. А. Яценко [14] для стержневых систем, состоящих из железобетона, на основе метода перемещений и смешанного метода рассмотрена задача расчета статически неопределимых систем, материал которых обладает свойствами ползучести и старения. Наследственная задача сведена к расчету некоторой упругой системы, жесткостные характеристики и геометрия расчетной схемы которой учитываются введением параметра λ , зависящего от ползучести основного материала. Рассмотрен случай, когда материал элементов системы имеет различный возраст.

В работе Н. Х. Арутюняна, А. Д. Дроздова и В. Э. Наумова [8] дается постановка начально-краевой задачи для растущего вязкоупругого тела с учетом возрастной неоднородности и старения материала в наращиваемых стержнях и массивных телах при малых деформациях. Исследуется напряженно-деформированное состояние в растущем полом цилиндре, диске, шаре и др.

В диссертации Д. В. Пуляевского [15] рассмотрена задача определения напряженно-деформированного состояния наращиваемой конструкции моста с учетом линейной ползучести, усадки и старения бетона. Составлена программа на основе МКЭ. Учет перечисленных факторов производится пошаговым методом с формированием на каждом этапе расчета дополнительного вектора псевдо-нагрузки, добавляемого в разрешающую систему уравнений.

В книге «Эволюционная теория жизненного цикла механических систем» [16] Г. В. Васильков, рассматривая вопросы ползучести, отмечает, что в рассматриваемой им модели вязкопластичности предполагается, что ползучесть материала возникает одновременно с квазистатическим нагружением системы, понимая под этим состояние системы после завершения строительства (при этом $E = E_0$).

В настоящей диссертационной работе учет ползучести и твердения бетона происходит уже на этапе возведения, при поэтажном формировании расчетной схемы, с учетом нагружения элементов в разном возрасте бетона.

В основу расчетов монолитных рам и безригельных каркасов с учетом ползучести, выполненных в данной работе, заложена теория линейной ползучести стареющего материала Г. Н. Маслова – Н. Х. Арутюняна, обоснование которой дано в работе Н. Х. Арутюняна [17].

Основные предпосылки этой теории таковы:

- 1) материал рассматривается как однородное изотропное тело;
- 2) между напряжениями и деформацией ползучести выполняется линейная зависимость;

3) для деформации ползучести применим принцип наложения воздействий.

На основании многочисленных опытов, проведенных в нашей стране и за рубежом, установлено, что с ростом величины напряжений ползучесть бетона возрастает быстрее напряжений. Причем эта нелинейность наблюдается даже при самых низких уровнях напряжений, хотя и не столь существенно. Поэтому принято считать, хотя это и не точно, что до уровня напряжений, не превышающего половины призмочной прочности бетона, связь между напряжениями и деформациями ползучести при сжатии линейна. Также опыты показывают, что в пределах эксплуатационных напряжений применение принципа наложения вполне оправдано [18, с. 137, 158].

Закон изменения меры ползучести, согласно [17], принят в виде

$$C(t, \tau) = \varphi(\tau)[1 - e^{-\gamma(t-\tau)}], \quad (1)$$

где

$$\varphi(\tau) = C_0 + \frac{A_1}{\tau}, \quad (2)$$

дающем удовлетворительное совпадение с опытными кривыми ползучести, полученными как в старом, так и в молодом возрасте бетона, а также отражающем основные свойства бетона – его старение и наследственность.

Для закона изменения модуля мгновенной деформации бетона принята экспоненциальная зависимость:

$$E(\tau) = E_0[1 - \beta e^{-\alpha\tau}]. \quad (3)$$

В выражениях (1)–(3) приняты обозначения: C_0 – предельное значение меры ползучести; τ – возраст бетона, в котором к нему прикладывается нагрузка; t – возраст бетона к моменту определения деформации ползучести, $t > \tau$; $A_1, E_0, \alpha, \gamma, \beta$ – некоторые константы, значения которых определяются опытным путем в зависимости от условий твердения и состава данного бетона.

Н. Х. Арутюнян предложил определять напряжения в стержневых элементах с учетом ползучести бетона умножением упругомгновенных напряжений в бетоне и арматуре на поправочные коэффициенты, вычисляемые по приведенным ниже выражениям.

В сжатых элементах при одновременном учете ползучести бетона и изменения его модуля мгновенной упругости:

- для арматуры

$$Z_a(t) = 1 + \frac{\gamma \cdot E_a \cdot \varphi(\tau_1)}{m(\tau_1) \cdot (1 + \mu \cdot m(\tau_1))} \cdot \int_{\tau_1}^t e^{-\int_{\tau_1}^{\tau} \left[\gamma \left(1 + \mu \cdot \frac{E_a \varphi(x)}{1 + \mu \cdot m(x)} \right) + \frac{\mu \cdot \left(\frac{d}{dx} m(x) \right)}{1 + \mu \cdot m(x)} \right] dx} d\tau; \quad (4)$$

- для бетона

$$Z_b(t) = 1 - \frac{\mu\gamma \cdot E_a \cdot \varphi(\tau_1)}{1 + \mu \cdot m(\tau_1)} \cdot \int_{\tau_1}^t e^{-\int_{\tau_1}^{\tau} \left[\gamma \left(1 + \mu \cdot \frac{E_a \varphi(x)}{1 + \mu \cdot m(x)} \right) + \frac{\mu \cdot \left(\frac{d}{dx} m(x) \right)}{1 + \mu \cdot m(x)} \right] dx} d\tau. \quad (5)$$

Здесь m – отношение E_a / E_b ; $m(x) = E_a / E_b(x)$, μ – коэффициент армирования поперечного сечения.

В изгибаемых элементах, при одновременном учете ползучести бетона и изменения его модуля мгновенной упругости, эти коэффициенты, согласно [17], определяются следующими соотношениями.:

- для арматуры

$$Z_a(t) = 1 + \frac{\gamma E_a \varphi(\tau_1)}{m(\tau_1) [1 + \mu m(\tau_1) n_0]} \cdot \int_{\tau_1}^t e^{-\int_{\tau_1}^{\tau} \left\{ \gamma \left[1 + \frac{\mu E_a \varphi(x) n_0}{1 + \mu m(x) n_0} \right] + \frac{\mu m'(x) n_0}{1 + \mu m(x)} \right\} dx} d\tau; \quad (6)$$

- для бетона

$$Z_b(t) = 1 - \frac{\mu\gamma E_a \varphi(\tau_1) n_0}{1 + \mu m(\tau_1) n_0} \cdot \int_{\tau_1}^t e^{-\int_{\tau_1}^{\tau} \left\{ \gamma \left[1 + \frac{\mu E_a \varphi(x) n_0}{1 + \mu m(x) n_0} \right] + \frac{\mu m'(x) n_0}{1 + \mu m(x)} \right\} dx} d\tau. \quad (7)$$

где:

F_b – площадь бетона в сечении;

I_0 – момент инерции бетонной части поперечного сечения относительно главной оси сечения;

h_a – расстояние от центра тяжести арматуры до главной оси сечения;

$$n_0 = 1 + \frac{F_b h_a^2}{I_0}, \quad (8)$$

Таким образом, применение формул теории линейной ползучести стареющего материала Г.Н. Маслова – Н.Х. Арутюняна позволит уточнить реальное распределение напряжений в бетоне и арматуре в элементах конструкций, возводимых с ускорением сроков строительства.

Теория Маслова – Арутюняна была использована в работах [19–22] при определении напряженно-деформированного состояния железобетонных монолитных рам и безригельных монолитных каркасов, возводимых с ускорением сроков строительства. Известно, что ползучесть и деформативные свойства бетона сильнее всего сказываются при нагружении бетона в раннем возрасте, когда его механические характеристики далеки от нормативных величин. Расчет выполнялся методом сеточной аппроксимации элементов (МСАЭ) с учетом фактора времени. Полученные результаты для безригельного каркаса, возводимого со скоростью 9 дней на этаж, показали

увеличение напряжений в арматуре сжатых пилонов на 70 МПа по сравнению с обычным расчетом, не учитывающим истории возведения. Расчет многоэтажной рамы, в которой, кроме перечисленных факторов, была учтена еще и нелинейность работы бетона, показал превышение напряжений в арматуре колонн и ригелей более чем в два раза по сравнению с классическим расчетом, и соответствующее уменьшение напряжений в бетоне этих элементов.

Выводы:

1. В отличие от сборных конструкций, расчет монолитного железобетона с учетом последовательности возведения и нагружения, особенно возводимого в короткие сроки, требует учета сложных реологических свойств бетона: старения, ползучести, изменения мгновенно-упругого модуля деформации.

2. Применение метода сеточной аппроксимации элементов (МСАЭ) позволит учесть ползучесть и старение бетона в рассмотренных наращиваемых монолитных каркасах при различном возрасте материала колонн и ригелей, и выявить реальное распределение напряжений в поперечном сечении наиболее ответственных элементов. Использование закона наложения деформаций ползучести делает возможным получение напряженно-деформированного состояния любого элемента конструкции с учетом истории возведения и эксплуатации рассматриваемого объекта.

3. Применение метода сеток позволит учесть отдельно работу бетона и арматуры в поперечном сечении, а также ввести в расчет любые интегральные и дифференциальные зависимости, описывающие изменение механических характеристик материала с течением времени.

Кроме того, всегда желательно иметь альтернативный метод расчета, основанный на другой концепции, чтобы сравнить полученные результаты для повышения их надежности.

Список литературы

1. Сапожников А. И., Григорьев С. М. Учет последовательности возведения зданий методом конечных элементов с поэтажным формированием расчетной модели // Строительная механика и расчет сооружений. 2010. № 1. С. 19–26.
2. Кабанцев О. В., Карлин А. В. расчет несущих конструкций зданий с учетом истории возведения и поэтапного изменения основных параметров расчетной модели. // ПГС. 2012. № 7. С. 33–35.
3. Завьялова О. Б. Учет последовательности монтажа конструкций при расчете усилий в рамных системах // Известия вузов. Строительство. 2009. № 2. С. 115–122.
4. Ржаницын А. Р. Теория ползучести. М. : Стройиздат, 1968. 416 с.
5. Арутюнян Н. Х., Зевин А. А. Расчет строительных конструкций с учетом ползучести. М. : Стройиздат, 1988. 256 с.
6. Рашба Э. И. Определение напряжений в массивах от действия собственного веса с учетом порядка их возведения // Сб. тр. ин-та строит. механики АН УССР. 1953. № 18. С. 23–27.
7. Lew H. S. Construction loads and effects in concrete building construction // Concr. Int. Des. And Constr. 1985. Vol. 7, № 4. P. 20–23.

8. Арутюнян Н. Х., Дроздов А. Д., Наумов В. Э. Механика растущих вязкоупруго-пластических тел. М. : Наука, 1987. 471 с.
9. Lee E. H., Rogers T. G. Thermo-viscoelastic stresses in a sphere with an ablating cavity // Progress in Applied Mechanics (The Prager Anniversary Volume). New York : Macmillan Co., 1963. P. 355–371.
10. Shinozuka M. Stresses in a linear incompressible – Рус. пер.: Шиноцука М. Напряженное состояние цилиндра с перемещающейся внутренней границей из линейного несжимаемого вязкоупругого материала // Прикл. механика. Тр. амер. об-ва инж.-мех.– 1963. Т. 30, № 3. С. 19–25.
11. Soliman F. The state of stress and strain in an orthotropic heterogeneous viscoelastic cylinder with burning inner boundary // Trans. Soc. Rheol. 1966. Vol. 10, № 1. P. 133–156.
12. Харлаб В. Д. Линейная теория ползучести наращиваемого тела. Л. : ЛИСИ, 1966. Вып. 1. С. 93–119.
13. Харлаб В. Д. Меры ползучести железобетона. Л. : ЛИСИ, 1966. Вып. 49. С. 84–92.
14. Бовин В. А., Яценко Е. А. Расчет железобетонных статически неопределимых стержневых систем с учетом ползучести // Ползучесть и усадка бетона. Киев, 1969. С. 27–37.
15. Пуляевский Д. В. Исследование напряженно-деформированного состояния наращиваемых систем с учетом нелинейной ползучести материала : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2007. 23 с.
16. Васильков Г. В. Эволюционная теория жизненного цикла механических систем: теория сооружений. Л. : ЛКИ, 2008. 320 с.
17. Арутюнян Н. Х. Некоторые вопросы теории ползучести. М. : Гостехиздат, 1952. 323 с.
18. Александровский С. В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменение температуры и влажности с учетом ползучести. М. : Стройиздат, 1973. 432 с.
19. Завьялова О. Б., Шеин А. И. Расчет монолитных железобетонных каркасов с учетом последовательности возведения, физической нелинейности и ползучести бетона // Строительная механика и расчет сооружений. 2012. № 5. С. 64–69.
20. Завьялова О. Б. Учет истории нагружения монолитных железобетонных плитно-стержневых систем при определении напряженного состояния их элементов // ПГС. 2012. № 7. С. 58–61.
21. Завьялова О. Б., Шеин А. И. Влияние физической нелинейности бетона на напряженно-деформированное состояние элементов монолитных железобетонных рам, рассматриваемых с учетом истории нагружения // ПГС. 2012. № 8. С. 29–31.
22. Завьялова О. Б. Уточнение напряжений в рабочей арматуре монолитных плит безригельных каркасов, возводимых с ускорением сроков строительства, при учете реального модуля упругости и ползучести бетона раннего возраста // ПГС. 2014. № 5. С. 50–54.