

д.т.н. **Барабаш М.С.**,
Национальный Авиационный Университет, Киев
аспирантка **Башинская О.Ю.**,
Национального Авиационного Университета, Киев
Запоточний Р.М.,
главный инженер ТзОВ «Спецбудсервис», Львов

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ПОЛЗУЧЕСТИ НА ПРИМЕРЕ МОСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В статье рассматриваются результаты влияния эндогенных и экзогенных факторов на развитие деформаций усадки и ползучести на примере расчетной схемы моста в ПК «ЛИРА - САПР». А также приводятся основные методы решения уравнения равновесия упруго – ползучей среды.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, упругое последствие, мгновенные деформации, реологические свойства бетона, ползучесть, усадка, численное моделирование

The article considers the results of the effect of endogenous and exogenous factors on the development of shrinkage strain and creep at the example of the computational model of the bridge at the software "Lira - CAD". Also the main methods for solving the equations of equilibrium of elastic - creep environment are supplying.

Keywords: stress-strain state, instantaneous deformation, rheological properties of concrete, creep, shrinkage, numerical modelling

Вступление

Надежность и долговечность бетонных и железобетонных конструкций и сооружений не может быть обеспечена без учета важных особенностей деформирования бетона. Реологические свойства бетона, обусловленные, в основном, его свойством ползучести, оказывают большое влияние на напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкции во времени, даже если внешняя нагрузка не претерпевает особых изменений. Так, с течением времени происходит перераспределение усилий между сильно и слабо нагруженными элементами, между арматурой и бетоном в сечениях элементов [7, 9].

Наращение перемещений во времени также оказывает существенное влияние на НДС конструкции, изменяющееся с течением времени. Особенно это сказывается для таких конструкций, как пологие железобетонные оболочки, для которых уменьшение стрелы подъема может сказаться на увеличении усилий в несколько раз и привести к аварии. Прогнозирование длительного

деформирования бетона во времени является актуальным, т.к. от правильного учета этих особенностей бетона и железобетона при проектировании зависит надежность и долговечность сооружений, а также соответствие сооружения предъявляемым к нему требованиям.

Необходимо отметить, что проектируемое сооружение кроме надежности, безопасности и экономической целесообразности должно обеспечить функциональную пригодность. Определение функциональной пригодности сооружений невозможно без правильного прогнозирования перераспределения напряжений между бетоном и арматурой происходящего вследствие ползучести бетона.

Действующие нормы проектирования практически не учитывают фактор времени и срок службы в расчетах несущих конструкций. Однако, с течением времени железобетонные конструкции изменяют свои жесткостные характеристики, в частности снижаются прочность и модуль упругости бетона.

Напряжения в арматуре и бетоне следует определять по расчетным диаграммам состояния материалов исходя из суммарных относительных деформаций от всех воздействий, включая начальные и развивающиеся в процессе эксплуатации конструкции (усадка, ползучесть, набухание, предварительное напряжение, самонапряжение и т. п.).

Развивающийся во времени процесс разрушения связывают с явлением ползучести, вследствие чего происходит накопление повреждений. Кривую длительной прочности строят в координатах напряжение-время до разрушения для данного напряжения. В двойных логарифмических координатах часто получают два отрезка прямых. Первый участок соответствует вязкому разрушению при высоких уровнях нагрузок, второй участок соответствует хрупкому разрушению в результате накопления микротрещин в межзеренных образованиях.

Несущая способность эксплуатируемой конструкции может быть точно установлена лишь при ее разрушении, что неприемлемо с практической точки зрения, а неразрушающие методы контроля дают лишь косвенную информацию о состоянии объекта. Поэтому важным моментом становится проведение численного эксперимента по определению действительного напряженно-деформированного состояния.

Основные методы определения деформаций ползучести

В общем виде полные деформации любого материала можно представить в виде суммы упругих деформаций и деформаций ползучести [1] и выразить при помощи интеграла Волтерры:

$$\varepsilon(t, t_0) = \frac{\sigma_x(t)}{E(t)} - \int_{t_0}^t \sigma_x(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \left[\frac{1}{E(\tau)} + C(t, \tau) \right] dt, \quad (1)$$

где t_0 – первоначальный момент времени, t - рассматриваемый момент времени определения деформаций, τ - время приложения загрузки.

Ядро этого уравнения выражается в виде:

$$K(t, \tau) = \frac{\partial}{\partial \tau} \left[\frac{1}{E(\tau)} + C(t, \tau) \right], \quad (2)$$

где $\frac{1}{E(\tau)}$ – модуль мгновенной деформации, $C(t, \tau)$ – мера ползучести бетона.

Существует много различных гипотез по определению меры ползучести бетона, но максимально согласуется с экспериментальными данными теория, согласно которой меру ползучести выражают в виде следующей функциональной зависимости:

$$C(t, \tau) = \varphi(\tau) f(t - \tau), \quad (3)$$

При этом функцию $f(t - \tau)$ следует выразить в виде суммы экспоненциальных функций вида:

$$f(t - \tau) = \sum_{k=0}^m B_k e^{-\gamma_k(t-\tau)}, \quad (4)$$

где B_k и γ_k - постоянные, подобранные надлежащим образом для данного материала, причем

$$B_0 = 1, \gamma_0 = 0 \text{ и } \gamma_k > 0.$$

А функцию $\varphi(\tau)$ следует представлять в виде

$$\varphi(\tau) = C_0 + \sum_{k=1}^m \frac{A_k}{\tau^k} \text{ при } (\tau > 0), \quad (5)$$

где C_0 - предельное значение меры ползучести, A_k, τ^k - некоторые параметры, которые зависят от свойств и условий старения для данного материала.

Но при оценке влияния ползучести на напряженно - деформированное состояние мостов обязательно следует также учитывать изменение во времени модуля мгновенной деформации бетона. И очень большую роль играет выбор закона изменения этого модуля во времени.

Функции гиперболического типа в такой задаче не дают удовлетворяющих результатов, поэтому лучше всего выразить изменение величины $E(\tau)$ также при помощи экспоненциальной зависимости:

$$E(\tau) = E_0 [1 - \beta e^{-\alpha \tau}], \quad (6)$$

где E_0, β, α - некоторые константы, которые зависят от состава и условий твердения данного бетона.

В EuroCode prEN 1992-1-1 [12] предложена формула для учёта влияния ползучести, согласно которой, на деформации упругого последствия оказывают влияние следующие факторы: температура окружающей среды, возраст бетона в момент нагружения, размеры сечения элемента и характеристики бетона. В этом случае деформации ползучести можно вычислить по формуле:

$$\varepsilon(\infty, t_0) = \varphi_0(\infty, t_0) \left(\frac{\sigma_c}{E_{c0}} \right). \quad (7)$$

При этом коэффициент ползучести $\varphi(T)$ следует определять по формуле:

$$\varphi(\tau) = \varphi_0 \left(\frac{T}{T + \beta_H} \right)^{0.3}, \quad (8)$$

где τ – количество суток (возраст бетона), по прошествии которых требуется учесть влияние ползучести; φ_0 – теоретический коэффициент ползучести, который показывает во сколько раз увеличивается деформация за бесконечное время действия нагрузки; β_H – коэффициент, что зависит от относительной влажности и теоретического размера элемента.

Функция старения $\varphi(\tau)$ непрерывна, ограничена и с увеличением возраста материала стремится к постоянной C_0 , то есть к величине меры ползучести в старом возрасте [2]:

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} \varphi(\tau) = C_0. \quad (9)$$

Алгоритм вычисления коэффициентов β_H и φ_0 приведён в [4].

Расчёт конструкции моста с учётом влияния эффекта ползучести в ПК «ЛИРА-САПР»

В качестве примера рассмотрим работу конструкции моста с учётом деформации упругого последствия согласно нормам EuroCode prEN 1992-1-1 [12].

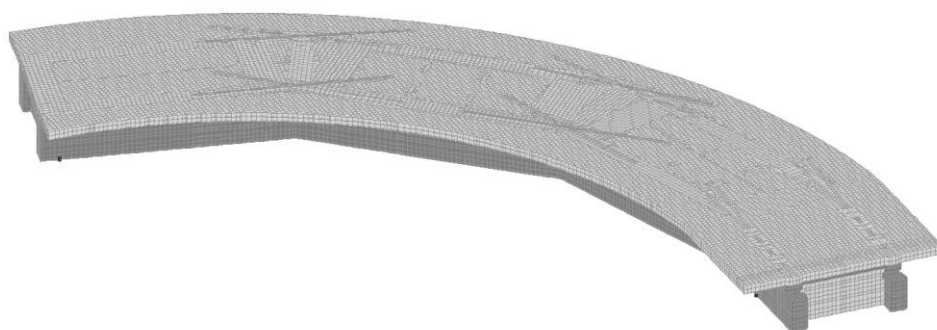


Рис. 4. Расчётная схема моста.

Работа железобетонных конструкций носит нелинейный характер. Расчётная модель моста была построена при помощи универсальных пространственных изопараметрических КЭ № 34 и 36 (для моделирования работы арматурных стержней) и физически нелинейных КЭ № 234 и 236 (для моделирования работы монолитного бетона). Для задания параметров нелинейного расчёта деформирования бетона был использован 15-й экспоненциальный закон.

При расчёте конструкции с учётом ползучести учитываются нелинейные деформации. Для учета нелинейности в ЛИРА –САПР был выбран простой шаговый метод с количеством шагов равным 30. Для выполнения нелинейного расчёта в ПК ЛИРА-САПР, с учетом степенного закона ползучести во времени (EuroCode prEN 1992-1-1), предварительно вычисляется коэффициент

ползучести φ_0 и коэффициент β_H , которые зависят от относительной влажности (RH в %) и условного размера сечения (h_0 в мм).

Сравнение и анализ результатов расчёта выполнен по кинематическим характеристикам – перемещение расчётных характерных точек моста в направлениях «X», «Y», «Z».

Таблица 1. Максимальные перемещения моста, мм

Направление	Расчёт в упругой стадии	Расчёт с учётом ползучести				
		28 дней	365 дней	2 года	10 лет	50 лет
«X»	4.73	5.68	6.49	6.69	6.86	7.07
«Y»	3.27	3.93	4.5	4.65	4.76	4.91
«Z»	23.1	29	34.1	35.4	36.4	37.7

Из таблицы видно, что полученные перемещения по результатам расчёта с учётом ползучести значительно выше, нежели при обычном статическом расчёте. Со временем вертикальные перемещения начинают превышать максимально допустимые (в рассматриваемой конструкции они составляют 30 мм).

Вследствие проявления деформаций ползучести, в бетоне начинают меняться его физические характеристики. Изменение модуля деформации во времени для рассматриваемой расчётной схемы показано на рисунке 5.

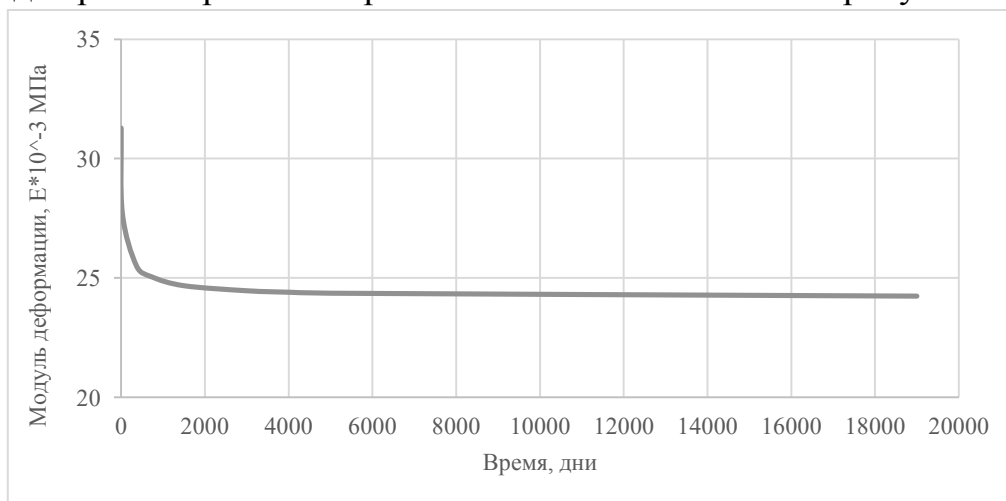


Рис. 5. График изменения модуля деформации в бетоне с течением времени.

Приведённый график показывает, что по мере старения бетона его модуль деформации $E(\tau)$ понижается, причем в молодом возрасте, особенно в первый месяц приложения загрузки $E(\tau)$ падает значительно быстрее. В дальнейшем, с увеличением возраста бетона, скорость понижения $E(\tau)$ постепенно также падает и приблизительно через год данное явление принимает асимптотический характер, т.е.

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} E(\tau) = E_0, \quad \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{dE(\tau)}{dt} = 0. \quad (10)$$

Следуя из этого выражения можно говорить, что начиная с некоторого возраста $\tau = \tau_0$, модуль деформации бетона $E(\tau_0)$ будет совсем незначительно отличаться от предельного значения E_0 . Это свидетельствует о том, что процесс твердения бетона практически завершился. Поэтому начиная с возраста $\tau = \tau_0$ бетон можно считать старым, так как время больше не оказывает такого сильного влияния на изменения величины его модуля деформации. А при всех значениях $\tau \geq \tau_0$ будет иметь место следующее асимптотическое равенство:

$$E(\tau) \approx E_0. \quad (11)$$

В результате изменения физических характеристик бетона, начинает происходить перераспределение усилий между составляющими элементов конструкции. Изменение напряженного состояния во времени в одном из объемных конечных элементов бетона мостового полотна представлено в таблице 2.

Таблица 2. Максимальные усилия в одном из КЭ мостового полотна, кН.

Усилие	Расчёт в упругой стадии	Расчёт с учётом ползучести				
		28 дней	365 дней	2 года	10 лет	50 лет
Nx	-3020	-2360	-2100	-2050	-1990	-1980
Ny	-2850	-2200	-1950	-1910	-1850	-1840

Приведённые данные свидетельствуют о появлении в бетоне явления релаксации. Поскольку бетон больше не в состоянии воспринимать нагрузку, которую он нёс с момента приложения загрузки, то излишние усилия переходят в арматурные стержни.

Визуализация данного процесса приведена на рисунке 6.

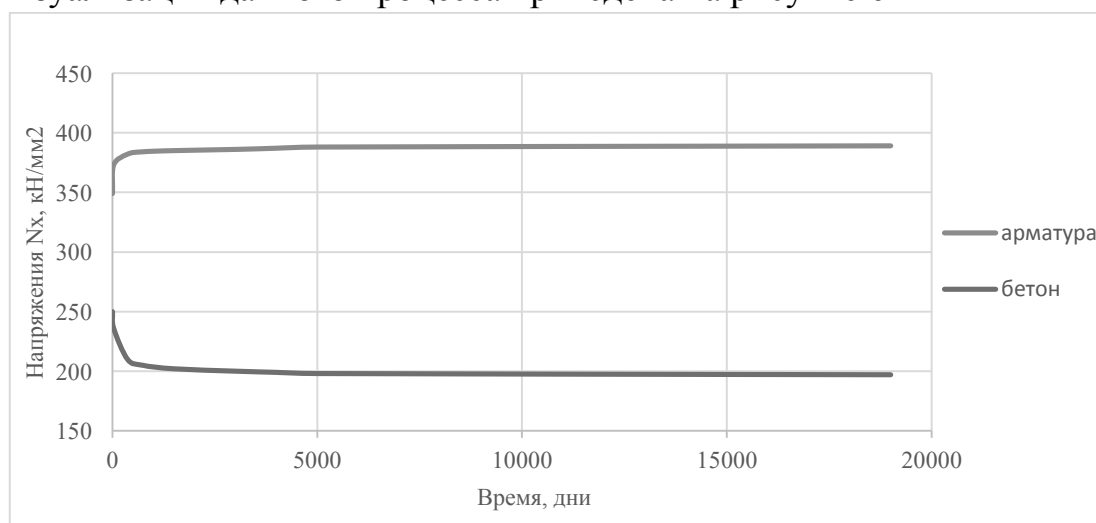


Рис. 6. Изменение продольных усилий с течением времени в бетоне и арматуре.

Таким образом, существенные изменения напряженно – деформированного состояния в бетоне и арматурных стержнях

свидетельствуют о недостаточности простого статического расчёта при проектировании мостовых сооружений.

Выводы

В статье были рассмотрены основные функциональные зависимости для решения задачи равновесия упруго – ползучей среды. Также проанализирована работа мостовой конструкции с учётом появления эффектов упругого последействия. Построены графики изменения статических и кинематических характеристик элементов конструкции.

Использование физически нелинейных законов деформирования, а именно компьютерное моделирование эффекта ползучести в задачах расчёта мостовых сооружений позволяет проанализировать процесс изменения их напряженно-деформированного состояния во времени. Отмечено увеличение напряжений в арматуре с течением времени, в связи с чем рекомендуется учитывать явление ползучести при проектировании мостовых конструкций.

Недостаточная оценка влияния реологических свойств бетона в процессе проектирования мостов может привести к непригодности конструкции к нормальной эксплуатации, а иногда и к аварийным последствиям.

Литература

1. Арутюнян Н.Х. Некоторые вопросы теории ползучести / Арутюнян Н.Х. – М. : Гостехтеориздат, 1952 – 323 с.
2. Александровский С.В. Приложение теории ползучести к практическим расчетам железобетонных конструкций / С.В. Александровский, В.М. Бондаренко, И.Е. Прокопович // Сб. научн. трудов "Ползучесть и усадка бетона и железобетонных конструкций". – М. : Стройиздат, 1976. – С. 43–46.
3. Барабаш М. С. Методы моделирования изменения напряженно-деформированного состояния конструкций во времени / М. С. Барабаш // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2014. – Vol. 10, Issue 2. – С.92–100.
4. Барабаш М. С. Алгоритм моделирования и расчета конструкций с учётом ползучести бетона. / М. С. Барабаш, М.А. Ромашкина // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2013. –Vol. 9, Issue 4. – С. 56–63.
5. Бондаренко В.М. Инженерные методы нелинейной теории железобетона / В.М. Бондаренко, С.В. Бондаренко. – М. : Стройиздат, 1982. – С. 123–136.
6. Васильев П.И. Приложение теории ползучести бетона к расчетам массивных конструкций и мостов / П.И. Васильев, Я.Д. Лившиц // Сб. научн. трудов "Ползучесть и усадка бетонов и железобетонных конструкций" – 1976. – С. 356–362.
7. Гурьева Ю.А. Некоторые приложения упрощенной теории нелинейной ползучести нестарееющего бетона при сжатии / Ю.А. Гурьева // Промышленное и гражданское строительство. – 2008. – № 6. – С. 52–53.

8. Прокопович И.Е. Об учете влияния размеров элемента, влажности среды и нелинейной составляющей ползучести бетона при расчете релаксации и потерь преднапряжения / И.Е. Прокопович, В.И. Барановский, П.Л. Невелик // Строительные конструкции. – 1986. № 39 – С. 18–23.
9. Тамразян А. Г. Механика ползучести бетона / А. Г. Тамразян, С.Г. Есяян. – М. : МГСУ, 2012. – 490 с.
10. Тур В. В. Экспериментально-теоритические основы предварительного напряжения конструкций при применениинапрягающего бетона / В. В. Тур. – Брест: БГТУ, 1998. – 246 с.
11. Хасин В.Л. К расчету железобетонных элементов с учетом нелинейной ползучести бетона / В.Л Хасин // Сб. научн. трудов "Пути повышения производительности труда, сокращения сроков проектирования и строительства транспортных сооружений". – 1986. – С. 123–136.
12. Eurocode 2: prEN 1992-1-1 «Design of concrete structures - Part 1: General rules and rules for buildings» - Annex B(Informative) Committed of European Communities, Des 1991. P 226.
13. Suvorova J. V. An approach to the description of time — dependent materials / J.V. Suvorova // Materials and Design.- 2003. - № 24 – P. 293—297.