

АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ЗАВИСИМЫХ ОТ ВРЕМЕНИ СВОЙСТВ БЕТОНА: МЕЖДУНАРОДНЫЙ СОГЛАСОВАННЫЙ ФОРМАТ (перевод с англ. яз.)

Марио Альберто КИОРИНО, проф.

Современные конструкции из бетона, возводимые с использованием сложных последовательных методов строительства и/или характеризующиеся значительными неоднородностями, в целом, очень чувствительны к воздействиям, зависящим от поведения бетона во времени (ползучесть и усадка).

Руководящие принципы оценки этих эффектов были разработаны в последние десятилетия международными организациями, занимающимися предстандартами и стандартами, на основе общей, хотя и прогрессивно развивающейся, научной базы и, по существу, согласованного во всем мире формата.

Автор обсуждает развитие, при его большом личном участии, этого благоприятного сценария, обозначая области устоявшегося консенсуса и открытых проблем.

В вопросе, какими именно параметрами характеризуется эффект ползучести, обычно признается, что надежный анализ поведения конструкции в условиях эксплуатации может быть выполнен на основе линейной теории наследственной вязкоупругости, впервые созданной итальянским математиком Волтеррой на заре 20-го века.

В статье рассматриваются возможные последствия этого подхода для расчетов применительно, с одной стороны, к принятию реалистичных современных моделей для прогнозирования поведения бетона, связанного с ползучестью, и, с другой стороны, к сложности и последовательному характеру строительства, а также иллюстрирует современные обновленные руководящие принципы, разработанные на международном уровне, для оценки влияния ползучести, как на этапах предварительного и эскизного проектирования, так и при разработке рабочих чертежей и анализе долгосрочной надежности сложных и последовательных конструктивных систем.

Эти руководства предназначены также для рассмотрения других явлений, которые вызывают отклонения от линейной вязкоупругости при старении, таких как трещинообразование при растяжении, циклическая ползучесть и релаксация напряжений в преднапряженной арматуре при переменной деформации, а также влияние влажности и температурных колебаний.

Статья также была задумана как дань памяти Почетного члена ЕКБ (Евро-Международный комитет по бетону) и действительного члена Академии строительства и архитектуры СССР Алексея Алексеевича Гвоздева, в течение длительного времени руководившего лабораторией теории железобетона НИИЖБ, НИИ бетона и железобетона, который теперь назван его именем, за его решающую роль в оказании помощи и содействии автору на первых этапах продвижения в ЕКБ и ФИП (Международная федерация преднапряженного железобетона), создавших фундамент этого нового расширенного формата анализа ползучести, в изучение которой школа советских ученых и самого Гвоздева внесла основополагающий вклад.

Ключевые слова:

бетон, усадка, ползучесть, изменение линейной вязкоупругости во времени, структурные эффекты, последовательное строительство, концептуальный дизайн, рабочее проектирование и анализ надёжности при длительной эксплуатации, кодексы и рекомендации, школа А.А. Гвоздева.

1. Введение

Современные конструкции из бетона, возводимые с использованием сложных последовательных методов строительства и/или характеризующиеся значительными неоднородностями, в целом, очень чувствительны к воздействию отложенных деформаций, проявляющихся в поведении бетона, зависящего от времени (ползучесть и усадка).

Типичными примерами являются большепролетные консольные и вантовые мосты, железобетонные арки с напряжением арматуры домкратом, композитные сталежелезобетонные конструкции, железобетонные или сталежелезобетонные высотные и супервысотные здания. Некоторые из этих примеров представляют собой самые последние образцы применения конструкционного бетона.

Таким образом, реалистичная оценка влияния зависящего от времени поведения бетона на надежность конструкции на этапе строительства и во времени представляет собой важный аспект процесса проектирования и оценки функциональности.

Это требует, с одной стороны, определения надежных моделей прогнозирования явлений ползучести и усадки (проблема свойств материала), а с другой - разработку надежных расчетных методов оценки эффектов от этих явлений в конструкциях со степенью точности, соответствующей конкретному случаю (проблема расчетного анализа конструкций). Эти две проблемы взаимосвязаны, но часто считаются независимыми в практике проектирования и рассматриваются отдельно.

Первая из этих проблем, в частности, касается того, что связано с ползучестью, прогнозом долгосрочных тенденций и значений (на срок до 100 лет и более, что соответствует указанному сроку службы для оценки надежности конструкций особой важности [25]), характеризуется предстоящими дискуссиями в рамках международного научно-технического сообщества. Краткое современное состояние вопроса представлено в данной статье, в разделе 3.

В настоящей работе рассматривается, в частности, вторая из двух проблем, а именно оценка реакции конструкции во время развития напряжений ползучести и усадки, с особым акцентом на последствия ползучести.

В то время как ранние расчетные подходы к этой проблеме были основаны на слишком грубых упрощениях, в дальнейшем были разработаны адекватные критерии для адаптации к потребностям проектирования и оценки надежности; результаты исследований в области строительной механики и теоретической реологии постепенно расширялись. Эта передача знаний из научной области в область технических руководств и рекомендаций координировалась и поддерживалась международными организациями по предстандартам и стандартам в рамках общемирового широко согласованного сценария. Автор был в значительной степени вовлечен в этот процесс.

В результате этого прогресса сегодня можно констатировать, что оценка реакции конструкций на поведение бетона, зависящее от времени, на сегодня представляет собой набор международно согласованных основ и основных правил применения.

Кратко останавливаясь на историческом развитии событий этого благоприятного сценария в последние десятилетия, в статье представлен обзор текущего состояния кодексов, рекомендаций и руководящих документов в этой конкретной области на международном уровне, свидетельствующий об областях, по которым сложилось взаимопонимание, и о некоторых остающихся открытыми позициях.

2. Постепенное развитие согласованного формата кодексов и рекомендаций во всем мире

В течение 1960-70 годов внимание организаций, занимающихся разработкой предстандартов и

стандартов, было сосредоточено, главным образом, на первой из двух проблем, о которых шла речь во введении, а именно на прогнозировании зависящего от времени поведения бетона: сначала ЕКБ (Европейский комитет по бетону), а затем Американский институт бетона АСІ ввели в действие свои рекомендации и руководящие документы с конкретными моделями прогнозирования деформаций ползучести и усадки бетона.

Несколько лет спустя ЕКБ (переименованный в 1976 году в Евро-Международный комитет по бетону) счел, что настало время разработать соответствующие руководящие принципы по второй проблеме, а именно по оценке меры реагирования конструкций на эти деформации с поздним проявлением. После включения предварительного краткого раздела в Модельный Кодекс ЕКБ 1978 года [18] ЕКБ решил создать, при координации со стороны автора, специальное Руководство по проектированию [22], полностью посвященное этому вопросу и которое могло бы рассматриваться в качестве расширенного руководства, как для разработчиков кодекса, так и для инженеров-практиков. Опубликование в начале восьмидесятых годов этого Руководства ЕКБ, в основу которого был положен сборник самых передовых исследований того времени, способствовало достижению консенсуса на международном уровне в отношении общей научной базы и согласованного формата нормативных рекомендаций и технических руководящих документов в области зависящего от времени расчета конструкционного бетона.

Несмотря на постепенное развитие, позволяющее учитывать дальнейшие успехи в области исследований и возможности, предлагаемые с помощью развивающихся современных вычислительных технологий, эта же научная основа и согласованный формат представляли более двух десятилетий и по-прежнему представляют собой сферу действия для большинства документов, специально посвященных этой теме или содержащих руководящие критерии для этого заслуживающего особого внимания аспекта оценки надежности, разработанного международными организациями по стандартам и стандартам.

Хотя конкретные разделы документов были отредактированы, при координации автора, в рамках Кодекса ЕКБ-ФИП 1990 года [19] и в рамках Учебного пособия по конструкционному бетону ФИБ [23], в 2005 году в Приложение КК «Конструктивные воздействия зависящих от времени свойств бетона» Еврокода 2: «Проектирование бетонных конструкций - Часть 2: Бетонные мосты» [24] Европейским комитетом по стандартизации (ЕКС) было официально включено уточнение (с некоторыми неточностями, подлежащими пересмотру).

Совсем недавно эти обновленные знания легли в основу Раздела 7.2.4 «Анализ конструктивных воздействий зависящего от времени поведения бетона», под редакцией автора, Модельного кодекса ФИБ 2010 года, опубликованного в 2013 году [25], и обсуждаемого расширенного проекта руководящего документа АСІ 209.3R-XX «Анализ эффектов ползучести и усадки в железобетонных конструкциях», отредактированного, при координации автора, и утвержденного в 2013 году в Комитете АСІ 209 «Ползучесть и усадка в бетоне», который в настоящее время находится под окончательной редакцией Комитета по технической деятельности ТАС АСІ, чтобы стать официальным руководством АСІ [2].

В процессе пересмотра и обновлении Еврокода 2, в настоящее время идущего полным ходом, существующий текст Приложения КК к части 2 [24] должен быть надлежащим образом пересмотрен и будет, скорее всего, включен в основную часть Кодекса в качестве руководящего правила для оценки влияния зависящего от времени поведения бетона в любых конструкциях, принимая во внимание прогресс обсуждения и критерии руководства, разработанные в рамках АСІ и, в виде предстан дарта, в ФИБ.

В сценарии создания нового Модельного кодекса 2020 года, во всем, что касается аспекта моделей прогнозирования ползучести и усадки, внимание будет уделяться новым достижениям в области практического применения и анализа банков данных, а также потребности обеспечить, на самом современном уровне, имеющиеся в настоящее время, модели прогнозирования для новых типов бетона, таких, как ультрафункциональные бетоны и бетоны с добавками – заменителями цемента. Для проблемы анализа эффектов в конструкциях, связанных с характером работы бетона во времени, основные критерии из Модельного кодекса ФИБ 2010 года будут, по существу, сохранены, обращая внимание на прогресс в обеспечении точных и эффективных методов расчета, основанных на дифференциальных приближениях для конструкций, очень чувствительных к зависящему от времени поведению бетона, с особым отношением к сложным последовательным и пространственным конструкциям (см. разделы 3 и 4.2.1 в следующем).

3. Модели прогнозирования ползучести и усадки

Как было указано во введении, проблема оценки реакции конструкции на зависящее от времени поведение бетона, которая обсуждается в этой статье, не может быть полностью отделена от первой проблемы, связанной с созданием надежных моделей прогнозирования такого поведения, в частности, в отношении деформаций ползучести. Поэтому, прежде чем обсуждать форматы оценки степени реакции конструкции, коротко рассмотрим здесь влияние, которое формы, принятые для основного закона, характеризующего принимаемую модель прогнозирования ползучести, могут оказать на вычислительный аппарат, принятый для этой оценки.

Актуальный обзор состояния современных моделей прогнозирования ползучести на момент публикации представлен в руководстве ACI 209.2 R-08, отредактированном в 2008 году [1]. Этот вопрос обсуждается далее, например, в [21]. Руководство ACI 209.2 R-08 содержит описание проблемы и ограничения при разработке моделей прогнозирования, а также показывает и сравнивает возможности прогнозирования четырех моделей: ACI 209R-92, Базанта-Бавея В3, ЕКБ МС 90-99 и GL2000, представляющих, по состоянию на дату публикации данного Руководства, наиболее широко распространенные на международном уровне, среди развитых за прошлые два - три десятилетия, прогностические модели. В этой связи следует отметить, что модель ЕКБ МС 90-99 была недавно заменена пересмотренной моделью Модельного кодекса ФИБ МС 2010 (см. раздел 5.1.9.4 в [25] и соответствующий справочный документ), а модель Базанта-Бавея В3 была пересмотрена и заменена на модель В4, как указано впоследствии.

Сохраняющиеся расхождения и неопределенности подробно обсуждаются в [1] и [21]; для обзора наиболее значимых этапов сопровождавшейся научной дискуссии можно сделать ссылку на эти документы и включенную цитируемую литературу (см., например, здесь [9-11] и справочный документ [25]). Основные расхождения касаются критериев прогнозирования долгосрочных тенденций и значений ползучести в связи с сохраняющимся контрастом между необходимостью проведения оценок надежности конструкций, имеющих большой уровень ответственности, на срок до 100 лет или более [25], и нынешним наличием согласованной на международном уровне базы данных лабораторных исследований, по-прежнему ориентированных на краткосрочные периоды ползучести (менее одного десятилетия для большинства данных, за редкими исключениями), в связи с отсутствием исчерпывающих знаний в области материаловедения для решения проблемы с помощью физически обоснованных подходов. Следует упомянуть о недавних дискуссиях относительно возможности ссылаться на калибровку моделей ползучести на длительные периоды, в дополнение к базе данных

лабораторных испытаний, а также о недавно созданной базе данных о длительных чрезмерных прогибах для большепролетных мостов [8] и присущих ей преимуществ (наблюдения проводились в масштабе нескольких десятилетий) и недостатках (данные, относящиеся к конструкциям, характеризующимся сложным и многогранным механическим поведением на протяжении времени, а не к самому материалу, что подразумевает особые подходы к анализу). На основе этих последних соображений З.П. Базант и его исследовательская группа недавно предложили новую модель прогнозирования ползучести под названием «модель В4». См. [14,15,38-40] и упоминаемую в нем литературу.

В общей рекомендации, выработанной в ходе прений, подчеркиваются преимущества выполнения в каждом конкретном случае краткосрочных испытаний, что позволяет существенно уменьшить неопределенности моделей прогнозирования [см., например, пункты 9, 21].

Что касается, в частности, связи между форматами, принятыми для моделей прогнозирования ползучести, и последующей проблемой оценки реакции конструкций в течение времени, обсуждаемой в продолжении в разделе 4, следует отметить, что в большинстве рекомендуемых в настоящее время моделей прогнозирования (например, четыре модели включены в Руководство АСІ 209.2 R-08 [1]) напряжения, вызванные деформациями во времени (первоначальные плюс деформации ползучести), представляются функцией $J(t, t')$, определенной исходя из линейной теории наследственной вязкоупругости, как ответ напряжения в момент времени t на удельные нагрузки во время t' . Как хорошо известно в рамках линейной теории вязкоупругости при старении и подробно описано в разделе 4.1, применение принципа суперпозиции, который подразумевается в этой теории для моделирования возрастной зависимости реакции деформации на приращения напряжений, применяемые в разное время T , придает определяющему соотношению «напряжение - деформация» для ползучести бетона форму интегрального уравнения Вольтерры, характеризующегося наличием временного интеграла.

Таким образом, когда рассматривается история возникновения напряжений в существующей конструкции, необходим соответствующий числовой алгоритм для решения интегральных уравнений в отсутствие доступных аналитических решений для текущих форм функции ползучести $J(t, t')$ (см. Раздел 4.2). Во всех случаях, когда требуется уточненный расчетный анализ работы конструкции как во времени, так и в пространстве, например, в случае чувствительных к ползучести сложных разнородных и последовательных конструкций, этот алгоритм должен быть связан с численным расчетом, принятым для анализа конструкции в пространстве, например, 3D-анализ методом конечных элементов.

С другой стороны, как обсуждается в разделе 4.2.1, расчетная оценка воздействий, вызванных ползучестью во времени, может быть сделана, применяя более эффективный, аппроксимирующий основной закон интегрального типа с дифференциальным отношением, что также применимо для ассоциации с методом конечных элементов. Дифференциальный подход необходим также для исследования явлений, указанных в разделе 4.1, которые вызывают отклонения от принципа суперпозиции во времени (т. е. из решений, основанных на теории линейной вязкоупругости при старении) и которые могут повлиять на реакцию конструкции и должны быть учтены при более детальном анализе [9,37]. Для этого альтернативного варианта расчета функция ползучести, исходящая из рассматриваемой модели прогнозирования, должна быть преобразована в эквивалентный дифференциальный закон ползучести. В этой связи стоит отметить, что, если рассматриваются четыре модели, в настоящее время включаемые в Руководство АСІ 209.2R-08 [1], только в случае модели В3 [7] преобразование в дифференциальный закон основных компонентов неупругой деформации выполняется

очень просто, так как этот компонент уже первоначально установлен этой моделью и ее временным периодом на основе теории твердения [12,13].

4. Расчетный анализ конструкций с учетом фактора времени

4.1 Линейная наследственная вязкоупругость

Как и предполагалось в предыдущем разделе, в том, что касается учета эффекта ползучести, общепризнанно, что надежная расчетная оценка реакции конструкции в условиях эксплуатации (т. е. для напряжений меньше, чем, примерно, 0,4 прочности бетона) может быть выполнена на основе линейной теории наследственной вязкоупругости, в предположении линейности и наложения, что в свою очередь означает то, что реакции от деформаций во времени могут быть добавлены к существующим с учетом предыстории нагружения.

Хотя основы этой теории были заложены в теоретической механике сплошной среды в первые годы 20 века Вольтеррой [36], в соответствии с определением наследственной упругости, только в начале 40-х годов эта теория была признана инженерами-конструкторами как надлежащий математический инструмент для анализа ползучести бетонных конструкций. Пионерами этих ранних попыток были Маслов в 1941 году [32] и школа советских инженеров под руководством, в частности, А.А. Гвоздева, все остальные выступили более чем на три десятилетия позже (см., например, [3,26]). Мак-Генри [31] в США (1943) эту тенденцию обосновал посредством расширенного экспериментального подтверждения, в испытаниях на ползучесть герметически закрытых образцов, на основе принципа наложения, вытекающего из теории Волтерры. Он также изложил первые две теоремы линейной теории наследственной вязкоупругости для жестко защемленных однородных железобетонных элементов, продемонстрированные позднее Леви (1948-1951) [29, 30]. Значительный вклад в применение линейной теории наследственной вязкоупругости к проблемам ползучести для конструкций был осуществлен позже, и осуществляется сейчас, вплоть до настоящего момента, например, З.П.Базантом (см., например, [4-9,14,15,28] и список статей для скачивания с его веб-сайта в Северо-Западном университете), автором статьи, с изложением двух других теорем линейной наследственной вязкоупругости для однородных железобетонных элементов с одиночными или множественными изменениями состояния в рамках конструктивной системы (см., например, [16, 17, 20-23,35], и в публикациях [2, 18,19,25]), а также и другими авторами (см. среди других ссылок [33-35]). Для группы теорем линейной наследственной вязкоупругости для однородных железобетонных элементов с жесткими защемлениями см. здесь раздел 4.2.2.b.

Хотя были обнаружены некоторые существенные отклонения от линейности и принципа суперпозиции, различные авторы за последние десятилетия (см., например, [6,9,27,37]), в частности, при наличии изменений влажности и температуры с соответствующими изменениями в скорости твердения (или гидратации), с учетом релаксации напряжений и изменения направления деформаций, трещин и других повреждений бетона, проскальзывания арматуры, прогибов конструкции или нелинейности сцепления арматуры с бетоном, циклической ползучести, идея базирования анализа поведения во времени железобетонных конструкций на этом принципе и последовательной линейной теории наследственной вязкоупругости, стала общепринятой как упрощенное предположение для практики проектирования современных конструкций, при рассмотрении усредненного характера поведения массивных балок и плит, в которых содержание воды и температура не могут существенно и быстро изменяться, особенно, на ранних стадиях разработки концепции проекта и проектирования [1,2,4-6,16-25,28, 33-35]. В этих пределах подход линейной теории наследственной вязкоупругости,

сначала принятый в предстандарте ЕКБ - Модельном Кодексе 1978 [18] и широко используемый в соответствующем Руководстве по проектированию ЕКБ [22], систематически принимается в последнее время руководящими документами, рекомендациями и кодексами международных организаций по предстандартам и стандартизации [1,2,23-25].

Более точный расчет с учетом вышеупомянутых отклонений от принципа наложения (независимости действия сил) и связанных решений линейной теории наследственной вязкоупругости, с учетом различных причин проявления нелинейности, требуют, напротив, подробной оценки надежности конструкции с особым вниманием к конструкциям, которые особо чувствительны к ползучести, большим и сложным последовательным конструкциям (см. второй вариант в разделе 4.2.1).

Подход линейной теории наследственной вязкоупругости основан на использовании интегралов наследственности в уравнениях Волтерры, как основополагающего закона для бетона в следующих двух эквивалентных формах, представляющих результат через линейный принцип суперпозиции возникающих воздействий в бетоне при единице постоянного одноосно приложенного напряжения или, соответственно, деформации с переменными показателями этих приложенных воздействий и с учетом начального состояния в возрасте t_0 :

$$\varepsilon_{\sigma}(t) = \sigma(t_0)J(t, t_0) + \int_{t_0}^t J(t, t') d\sigma(t') \quad (1)$$

$$\sigma(t) = \varepsilon_{\sigma}(t_0)R(t, t_0) + \int_{t_0}^t R(t, t') d\varepsilon_{\sigma}(t') \quad (2)$$

где $\varepsilon_{\sigma}(t) = \varepsilon(t) - \varepsilon_n(t)$ – деформации при напряжения $\sigma(t)$, $\varepsilon(t)$ – полное напряжение и $\varepsilon_n(t)$ – независимая от напряжения деформация (усадка и температурные деформации), а $J(t, t')$ и $R(t, t')$ являются функциями ползучести и релаксации, представляющими, соответственно, деформацию или результирующее напряжение в момент времени t к единице приложенного постоянного одноосного напряжения σ или деформации ε_{σ} в момент времени t' [2,4-6,21,23,25,28].

В уравнениях (1) и (2) интегралы наследственности записываются как интегралы Стильтеса, чтобы допустить учет прерывистой истории нагружения после начального шага в t_0 . Если $\sigma(t)$ и $\varepsilon_{\sigma}(t)$ непрерывны после t_0 , замена $d\sigma(t') = [d\sigma(t')/dt'] dt'$ and $d\varepsilon_{\sigma}(t') = [d\varepsilon_{\sigma}(t')/dt'] dt'$ приводит к обычным интегралам Римана¹.

Функции ползучести и релаксации взаимно связаны интегральным уравнением:

$$1 = R(t_0, t_0) J(t, t_0) + \int_{t_0}^t J(t, t') dR(t', t_0) \quad (3)$$

где $dR(t', t_0) = \partial R(t', t_0)/dt'$.

4.2 Обзор текущих подходов к расчёту конструкций с учётом факторов, зависящих от времени, в кодексах и технических руководящих документах

Как предполагалось в разделе 3, в наиболее общем случае, расчетный анализ на основе линейной теории наследственной вязкоупругости конструкций, характеризуемых присутствием различных участков бетона с основным законом типа уравнения (1), и случаев присутствия упругих (сталь-

¹ Некоторые незначительные различия в форме представления этих фундаментальных уравнений в настоящее время существуют в документах [2,23-25]. Они будут устранены, принимая формулы (1) к (3) из настоящей статьи и связанных вышеприведенных определений, в особенности в новых изданиях Модельного Кодекса ФИБ и Еврокода 2, запланированных на 2020, а также в заключительном издании ACI 209.3R-XX, в настоящее время рассматриваемом Постоянным Техническим Комитетом ACI (ACI TAC).

ных) частей, а также подверженности сложным случаям воздействия нагрузок и наложенных деформаций и изменений конструктивной системы, приводят к системе наследственных интегральных уравнений Волтерры [2-4,6,17,20,22,23,25,26,28,34,35,37]. В настоящий момент установлено, что эти уравнения, а также уравнение (3), связывающее функции ползучести и релаксации, могут быть решены аналитически только для некоторых простых форм функции ползучести $J(t, t')$. К сожалению, таких формы, предложенные в прошлом многими исследователями (например, Макмилианом, Гленвиллом, Дишингером, Арутюняном, Леви, Улицким, Прокоповичем, Гвоздевым, Александровским, Ильстоуном, Нильсеном, и др.), представляют долгосрочную ползучесть и предельную ползучесть при нагружении, крайне недостаточно [2,6,9,22,23,28]. Одно из последних предложений этого типа происходило от Рюша и Юнгвирта (1973) и было включено в Типовой Кодекс ЕКБ 1978 [18], а также в Руководство по проектированию ЕКБ [22] как один из вариантов расчета.

Эти более ранние формы в настоящее время оставлены в прошлом, так как численное решение интегральных уравнений Волтерры может быть легко получено [4] для любой формы функции ползучести $J(t, t')$, как, например, для тех, которые обеспечены современными прогностическими моделями, обозначенными в разделе 3. Альтернативно, численный расчет может быть сделан более эффективным преобразованием функции ползучести к эквивалентному дифференциальному закону, который позволяет также фиксировать явления, вызывающие отклонения от принципа наложения во времени.

Эти два очень общих подхода для реализации численных решений задач расчетного анализа ползучести, которые не требуют введения непригодных упрощений для неупругой деформации ползучести, обычно называют “Общим методом”. Они обсуждаются здесь в разделе 4.2.1.

С другой стороны, когда не требуется высокоточный расчет, и на концептуальных и предварительных стадиях проектирования могут быть приняты некоторые удобные для расчета упрощения, нет необходимости вводить в этом случае любые искаженные формы для ползучести. Эти упрощения применяются, в частности:

а) на базисном уровне, посредством принятия приблизительной алгебраической формулы для основного закона уравнения (1); очень эффективная алгебраическая формула, предлагаемая методом, известным как метод Age Adjusted Effective Modulus (стандартизированный по возрасту усредненный модуль) (ААЕМ) [2,5,9,22,23,25,28], представлена в разделе 4.2.2.а;

б) на уровне конструктивной модели, введением приближенной предпосылки об эффективной реологической однородности железобетонной конструкции, или части железобетонного сооружения, которое включает и стальные конструктивные элементы, как это обсуждается в разделе 4.2.2.б [2,20,22-25,35].

Подход б) особенно полезен на концептуальной стадии проектирования.

Общий численный метод и два альтернативных упрощенных приближенных подхода а), и б) представляют собой основные три варианта, которые рассматриваются в международном согласованном формате для оценки работы конструкции с учетом характера работы бетона в зависимости от времени, принятого в большинстве недавних руководящих документах и рекомендациях на уровне предстандартов и стандартов [2,23-25]. Они кратко обсуждаются ниже. Дополнительную информацию можно получить из раздела 7.2.4 Модельного Кодекса ФИБ 2010 [25] и раздела 4.1.6 Учебника ФИБ по конструкционному бетону [23], а также в ACI 209.3R-XX [2].

Общее преимущество всех этих вариантов, в существующем контексте отсутствия согласия на международном уровне по вопросу о выборе наиболее адекватной модели прогнозирования ползучести бетона, которая будет принята в расчете надежности конструкции, представлено тем, что они не зависят от какой-либо определенной формулировки модели прогнозирования. Наоборот, они поз-

воляют проводить исследование поведения конструкции для любой модели прогнозирования ползучести, которую полагают соответствующей в данном конкретном случае, а также позволяют сравнивать результаты, полученные с включением в процесс расчета различных моделей прогнозирования.

4.2.1 Общий метод

В этом общем подходе современные алгоритмы вычислений для расчета упругости конструкций, такие, как, например, процедуры расчетного анализа методом конечных элементов, модифицируются путем включения основного наследственного закона интегрального типа уравнения (1), сформулированного в инкрементной форме, адаптированной к численному решению.

Как предполагалось здесь выше, возможны два различных варианта. Они состоят, соответственно, в рекурсивной численной процедуре, вытекающей из замены интегралов по времени прошлых историй напряжений или деформаций суммой [2,4,17,20,22,23,25,28,34] (*первый вариант*), или, альтернативно, в преобразовании основного закона интегрального типа в дифференциальный закон ползучести [2,9,15,25,28,37] (*второй вариант*).

Первый вариант имеет преимущество применения непосредственно, без необходимости в какой-либо адаптации, любых имеющихся многочисленных формул ползучести $J(t, t')$ обеспеченных моделями прогнозирования, предложенными в литературе и в руководящих документах на уровне предстандартов и стандартов и характеризующихся связанным интегральным основным законом уравнения (1). Удобные инструкции для рекурсивной числовой трактовки интегралов наследственности даны в разделе 7.2.4.11 Модельного Кодекса ФИБ 2010 [25], а подробный алгоритм приведен в ссылках [2,4,23,34].

В том, что касается этого варианта, следует отметить, что в очень больших и сложных системах конструкций учет всей истории напряжений или деформаций в каждой точке интегрирования каждого конечного элемента и оценка интегралов по времени могут вызвать большие вычислительные затруднения. Хотя постоянно увеличивающиеся скорости вычислений и мощности современных персональных компьютеров, как правило, отодвигают на задний план этот тип проблемы, расчет можно сделать более эффективным, используя второй вариант, который кратко обсуждается в продолжении, с раскрытием его преимуществ и открытых вопросов.

Этот *второй вариант* заключается в преобразовании основного закона ползучести интегрального типа, вытекающего из принципа суперпозиции, в эквивалентный закон ползучести дифференциального типа с внутренними переменными, текущие значения которых учитывают, как предысторию вязкоупругой деформации. В этом случае историю развития деформаций не нужно хранить, так как она подразумевается текущими значениями этих переменных. Ключевым свойством, позволяющим проводить дифференциальный анализ, является тот факт, что любое реалистичное интегральное отношение напряжения к деформации наследственной вязкоупругости может быть аппроксимировано с любой желаемой точностью с помощью соответствующих процедур по дифференциальному закону ползучести, визуализируемому моделью Кельвина [2,9,15,28,37].

Дифференциальные законы особенно полезны для решения конструкторских задач посредством метода конечных элементов, потому что они напрямую совместимы с этим вычислительным подходом. Они также облегчают учет эффектов от многочисленных изменений в конструктивной системе, как в сложных и последовательно армированном и/или предварительно напряженном железобетоне, или композитных сталебетонных конструкциях и пространственных конструкциях, таких как, например, подвесные консольные или вантовые мосты, высотные и супервысотные здания, и т.д.

Как и предполагалось в Разделе 3, дифференциальная форма также выгодна для того, чтобы охватить, кроме того, явления, указанные в разделе 4.1 и вызывающие отклонения от принципа суперпозиции при учете времени, т.е. от решений на основе линейной теории наследственной вязкоупругости. В моделировании и расчете предварительно напряженных железобетонных конструкций, дифференциальная форма основного закона с временной зависимостью для бетона облегчает обращение также с другим нелинейным явлением, представленным релаксацией напряжений стальной арматуры, которая не является вязкоупругой. Величина релаксации стали может значительно повлиять на напряжения в бетоне и, таким образом, должна быть принята во внимание при комплексном расчете конструкции с учётом факторов, зависящих от времени.

Все эти явления не могут быть учтены через традиционные интегралы по времени при использовании линейного вязкоупругого закона ползучести интегрального типа (1), основанные на предположениях линейности и суперпозиции во время для эффектов ползучести, потому что трещины, влажность и температура, в отличие от ползучести бетона, не имеют эффекта вязкоупругой памяти, а также потому, что трещинообразование и релаксация стали являются нелинейными явлениями. Они делают соотношение «напряжение-деформация» нелинейным и, при их включении, отношение «напряжение-деформация» дифференциального типа перестает подчиняться принципу суперпозиции [2,9,15,37].

Можно также отметить, что для этих уточненных подходов следует отдавать предпочтение местным основным законам для бетона (законы ползучести и усадки для материальной точки) вместо основных законов, осредненных по толщине [9,37]. Применительно к группе моделей прогнозирования ползучести и усадки, указанных в Руководстве ACI 209.2 R-08 [1], такой вариант предлагается только в модели В3 [7,37].

Важность дифференциального подхода была недавно подчеркнута также потребностью провести обратные расчеты, предназначенных для интерпретации временных зависимостей, заложенных в новом банке данных RILEM, с чрезвычайными чрезмерными отклонениями ряда сегментных предварительно-напряженных железобетонных мостов, для того, чтобы способствовать обновлению и проверке моделей прогнозирования (с учетом ползучести) для описания периода продолжительностью в несколько десятилетий [14,15,37-40].

При использовании закона ползучести дифференциального типа проблема ползучести конструкции может быть сведена к системе обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка во времени с зависимыми от времени коэффициентами. Для того, чтобы избежать сложности вычислений, более эффективным является преобразование инкрементного соотношения напряжений и деформаций для каждого временного шага в квазиупругое инкрементное соотношение напряжений и деформаций. Таким образом, задача ползучести конструкции сводится к последовательности задач упругости с начальными деформациями [2,9,15,28,37].

С эксплуатационной точки зрения, ACI 209.3R-XX [2], например, предоставляет рекомендации на основе самых продвинутых результатов обсуждений и исследований для реализации вычислительных процедур, которые будут приняты для преобразования основного закона наследственности интегрального типа, характеризующего современные модели прогнозирования ползучести, в дифференциальные законы, и для связанного с этим численного подхода, состоящего в последовательности решения задач упругости с начальными деформациями. Руководство приводит также критерии, которые будут приняты с учетом всех вышеперечисленных комплексных воздействий, подразумевающих отклонения от принципа линейной суперпозиции. Однако на данный момент, по-прежнему и по

существу, требуется ссылка на цитируемую специализированную литературу [9,15,37].

Комитет 209 ACI «Ползучесть и усадка в бетоне», в настоящее время планирует, через специальный подкомитет (209-0D «Численные методы и 3D-анализ»), дальнейшую деятельность, направленную на разработку удобных практических рекомендаций для выполнения численного анализа в объемной постановке задачи, зависящего от времени и основанного на подходе к ползучести дифференциального типа для проверки надежности сложных и последовательно армированных и/или предварительно напряженных железобетонных конструкций, или композитных сталебетонных конструкций, и вообще всех крупных конструкций с повышенной ползучестью. Эти руководящие принципы должны позволить практикующим инженерам определить надлежащие вычислительные процедуры и программы для рабочего проектирования и последующего мониторинга для проверки надежности в долгосрочной перспективе, до конца установленного срока службы, и / или использовать для того же назначения, с адекватным пониманием и признанием возможных недостатков, коммерческое программное обеспечение, предназначенное для этих целей.

4.2.2 Упрощенные подходы

а) Метод ААЕМ

Метод Age Adjusted Effective Modulus (ААЕМ, Метод эффективного модуля с поправкой на возраст) основан на принятии алгебраической формулы (5) для основного закона уравнения (1), когда функция ползучести $J(t, t_0)$ выделяется, как это часто делается, в номинальную начальную упругую деформацию и деформацию ползучести согласно выражению (4), вводящему коэффициент ползучести $\phi(t, t_0)$:

$$J(t, t_0) = \frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\phi(t, t_0)}{E_c(t_0)} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_\sigma(t) &= \varepsilon(t) - \varepsilon_n(t) = \sigma(t_0)J(t, t_0) + \frac{[\sigma(t) - \sigma(t_0)]}{E_c(t_0)} [1 + \chi(t, t_0)\phi(t, t_0)] = \\ &= \frac{\sigma(t_0)}{E_{c,ef}(t, t_0)} + \frac{\sigma(t) - \sigma(t_0)}{E_{c,adj}(t, t_0)} \end{aligned} \quad (5)$$

где $\chi(t, t_0)$ – коэффициент старения, связанный с функциями ползучести и релаксации ур. (6):

$$\chi(t, t_0) = \frac{1}{1 - R(t, t_0)/E_c(t_0)} - \frac{1}{E_c(t_0)J(t, t_0) - 1} = \frac{E_c(t_0)}{E_c(t_0)R(t, t_0)} - \frac{1}{\phi(t, t_0)} \quad (6)$$

и $E_{c,ef}$ и $E_{c,adj}$ – эффективный модуль и эффективный модуль с поправкой на возраст, соответственно.

Уравнение (5), совместно с уравнением (6), определяя коэффициент старения, представляют точную замену уравнения (1) для всех сложностей, связанных с предысторией деформаций и напряжений, возникающих в результате линейных комбинаций ползучести и задачи релаксации, т.е. для деформаций, характеризуемых начальным скачком в момент времени $t = t_0$ и последующим для $t > t_0$ изменением деформации, линейно связанным с функцией ползучести $J(t, t_0)$ (или, эквивалентно, с коэффициентом ползучести $\phi(t, t_0)$), и, как следствие, соответствующей историей развития напряжений, характеризуемой начальным скачком, сопровождаемым изменением напряжения, линейно связанным с функцией релаксации $R(t, t_0)$ [2,5,9,22,23,25,28].

Это включает широкий диапазон из последовательности развития деформаций и соответствующую историю развития напряжений. С достаточной точностью ее использование может быть расширено, чтобы охватить большое количество фактических предысторий в конструкциях, имеющих начальную конечную или нулевую величину при $t = t_0$ и часть с временной зависимостью, изменяющаяся с постепенно уменьшающейся скоростью через широкие интервалы времени. В текущем использовании метода ААЕМ, уравнение (5) дано в квазиупругой инкрементальной формулировке, связывающей изменения деформации и напряжения, появляющиеся после t_0 .

Если предыстория развития деформаций и напряжений включает в себя несколько последующих резких изменений в разы $ti > t_0$, тогда метод ААЕМ должен быть применен отдельно для каждого приращения и его результатов; другими словами, реакции на многоступенчатые предыстории могут быть получены путем наложения решений для нескольких одношаговых предысторий.

Поскольку долговременные величины $\chi(t, t_0)$ содержатся в довольно узкой полосе для различных величин t_0 , особенно для моделей GL2000 и ВЗ, они часто аппроксимируются на практике фиксированным значением $\chi = 0.8$, когда высокая точность в вычислениях не требуется, как, например, на концептуальных и предварительных стадиях проектирования и в оценке надежности конструкций с низкой чувствительностью к воздействиям с временной зависимостью [2,23-25].

Первоначально сформулированный для однородных конструкций из бетона, метод может быть также использован с расширением и с адекватной точностью для неоднородных железобетонных конструкций и сталежелезобетонных конструкций [2,22,23,25,28].

Необходимо отметить, что в модели прогнозирования ползучести Модельного Кодекса ФИБ 2010 [25] (а также в модели GL2000 [1]) в уравнение (4) вводится отличный от указанного коэффициент ползучести $\varphi_{28}(t, t_0)$ (представляющий собой отношение между деформацией ползучести и номинальным значением начальной упругой деформации в 28 суток). Поэтому уравнения (5) и (6) должны быть соответствующим образом адаптированы (см. раздел 7.2.4.10 Модельного Кодекса ФИБ 2010).

б) Решения линейной теории наследственной вязкоупругости для эффективных однородных железобетонных конструкций с усредненными реологическими свойствами

Этот подход основан на введении приближенной предпосылки об эффективной реологической однородности для всей железобетонной конструкции или для бетонной части конструкции, которая включает стальные конструктивные элементы.

На самом деле можно считать, что, если мы исключаем случаи, где присутствуют важные различия в свойствах ползучести, вызванные, например, значительными различиями в размере железобетонных конструкций или в их возрасте (что характерно для поэтапного строительства, которое может растянуться на многие месяцы, или для супервысоких зданий), влияние различий в ползучести часто значительно затмевается большими деформациями ползучести, развивающимися в течение длительного срока. Таким образом, этими различиями можно иногда пренебречь, в особенности на стадиях концептуального и предварительного проектирования, когда оценка общих тенденций развития длительных напряжений и деформаций в конструкции и оценка ее надежности со степенью точности, которая подходит для этих стадий, или при проверке общих результатов численных расчетов, и каждый раз, когда не требуется высокая точность расчетов с учетом ответственности конструкции и ее чувствительности к долгосрочным эффектам.

Этот подход, который использует простые решения, предоставленные фундаментальными теоре-

мами линейной наследственной вязкоупругости для однородных жестко защемленных бетонных элементов, и некоторые компактные формулы для однородных бетонных элементов с дополнительными конструктивными элементами стального армирования, имеет преимущества за счет лаконичности и концептуально ясного характера решений [2,20,22-25,29,30,35].

Для детального рассмотрения этих решений можно сослаться, в частности, на разделы 7.2.4.8-9 Модельного Кодекса ФИБ 2010 [25] и разделы 4.1.6 (8) - (9) из Учебника по железобетонным конструкциям ФИБ [23], а также на ACI 209.3R-XX [2] и упомянутую в нем литературу.

В случае однородной бетонной конструкции с жесткими защемлениями первые две теоремы линейной теории наследственной вязкоупругости указывают на отсутствие влияния ползучести в течение времени на упруго оцененном состоянии напряжений или, соответственно, напряжений при наложенных (постоянных или переменных) нагрузках или, соответственно, деформациях. Соответственно, они констатируют тот факт, что вариации последующих возникающих деформаций или, соответственно, напряжения моделируются с помощью функции ползучести $J(t, t')$ или, соответственно, функции релаксации $R(t, t')$. См. уравнения (7.2-27) к (7.2-34) из Модельного Кодекса ФИБ 2010 [25].

Две дальнейших теоремы, продемонстрированные автором [2,20,22-25,35], определяют эффекты в конструкции, загруженной системой постоянной нагрузки в момент времени t_0 , однократными или многократными изменениями конструктивной системы (заканчивающимися введением дополнительных жестких защемлений), примененных, соответственно, в момент времени $t_i \geq t_0^+$, или в последующие моменты $t_i \geq t_0^+$ ($i = 1, \dots, j$). Эти эффекты, с точки зрения перераспределения внутренних напряжений и внешних реакций, моделируются функцией перераспределения $\xi(t, t_0, t_i)$, определяющей величину ползучести в момент времени t_i , вызванной приобретением конструкцией, после модификации ее конструктивной схемы в моменты времени t_i , различий между распределением упругих напряжений, характеризующих конструктивную схему, измененную во время t_i , и распределением упругих напряжений до этой модификации. См. уравнения (7.2-35) и (7.2-37) из Типового Кодекса ФИБ 2010 [25].

Функция перераспределения связана с функциями ползучести или релаксации $J(t, t')$ и $R(t, t')$, соответственно, следующими интегральными выражениями:

$$J(t, t_0) - J(t_i, t_0) = \int_{t_i}^t J(t, t') d\xi(t', t_0, t_i) \quad (7)$$

$$\xi(t, t_0, t_i) = \int_{t_i}^t R(t, t') dJ(t', t_0) \quad (8)$$

Уравнение (7), соответствуя уравнению (7.2-36) из Модельного Кодекса ФИБ 2010 (для $t_i = t_1$), обычно принимается для определения функции перераспределения $\xi(t, t_0, t_i)$ от данной функции ползучести $J(t, t')$, которая требует решения интегрального уравнения Волтерры. Можно принять рекуррентный численный метод, указанный в разделе 4.2.1 (*первый вариант*).

Некоторые компактные формулы могут быть также получены для железобетонных конструкций с дополнительными стальными элементами армирования в случаях, когда конструкция может быть схематично представлена однородной бетонной конструкцией, нагруженной системой постоянных нагрузок, приложенных одновременно, и ограниченной системой n избыточных упругих защемлений, также приложенных в то же самое время, до или сразу после нагрузки; можно также рассмотреть состояние постоянных наложенных деформаций в местах применения избыточных упругих ограничений

(см. [2, 23, 25], а также литературу, упомянутую в этих документах).

Эти решения, которые сформулированы в матричной форме, представляют собой расширение на случай ограничений для решений в упругой форме линейной теории наследственной вязкоупругости для однородных конструкций с жесткими защемлениями, рассмотренными выше. Они базируются на некоторых фундаментальных функциях (именуемых функциями уменьшенной релаксации и обозначаемых R_i^*), представляющих структурные переменные, которые зависят как от функции соответствия ползучести $J(t, t')$ железобетонной конструкции, так и от собственных значений ω_i упругих матриц сцепления между этими двумя частями (бетонная конструкция и система n избыточных упругих ограничений, с $i = 1, 2, \dots, n$ обозначение универсального ограничения упругости). Для данной модели прогнозирования ползучести, и для отвечающего ей ползучести J , определение n уменьшенной функции релаксации, R_i^* требует решения n интегральных уравнений Волтерры, связывающих функции уменьшенной релаксации R_i^* к соответствующим образом измененным функциям ползучести J_i^* , зависящих от собственных значений ω_i .

В случае постоянно наложенных нагрузок с n избыточными упругими защемлениями, введенными перед нагрузками, в отличие от случая однородных железобетонных конструкций с жесткими защемлениями, для которых инвариантность состояния напряжения демонстрируется первой теоремой линейной вязкоупругости (см. выше), эти компактные формулы показывают, что начальное упругое состояние напряжения в конструкции и в защемлениях значительно изменяется ползучестью. Чем выше деформируемость упругих ограничений, тем выше разница между начальными и долговременными значениями напряженного состояния. В долгосрочной перспективе система напряжений имеет тенденцию приближаться к решению, соответствующему случаю жестких защемлений.

Снижение временной зависимости для напряжений при постоянных нагрузках при применении высокодеформируемых устройств, сдерживающих упругие деформации, можно получить через подходящие напряжения для этих защемлений. Фактически, в теоретическом случае эффективной однородной конструкции с упругими защемлениями, введенными одновременно в момент нагружения, получается инвариантность напряженного состояния, вызывающая защемления вплоть до значений реакции жестких защемлений.

В случае изменения условий защемления после нагружения путем введения дополнительного защемления упругости сразу после нагружения теоретические решения показывают, что система защемлений упругости в меньшей степени способствует изменению исходной системы напряжений в конструкции, вызывая более низкие значения реакций защемления по отношению к случаю отсроченных дополнительных жестких защемлений, о которых говорилось выше.

Эти компактные формулы для железобетонных конструкций с дополнительными упругими (стальными) конструктивными элементами могут быть приняты, например, в предварительном концептуальном проектировании связанных бетонных арок и рам, или вантовых железобетонных бетонных мостов и конструкций, игнорируя при этом на данном этапе проектирования неоднородности бетона и последовательный строительный подход, обычно принятый в практике, который должен быть должным образом рассмотрен, наоборот, в окончательном этапе проектирования и в расчете, учитывающем последующие изменения во времени.

4.3 Средства проектирования

Когда, в общем случае, как первичная функция одной из рекомендуемых моделей прогнозирования ползучести упоминается функция ползучести $J(t, t')$, соответствующие вторичные структурные переменные, представленные функциями релаксации и перераспределения $R(t, t')$ и $\zeta(t, t_\theta, t_i)$, могут быть

оценены, как указано в предыдущих разделах, через решения, соответственно, интеграла Волтерры по уравнениям (3) и (7), принимая рекурсивный численный расчет, приведенный в разделе 4.2.1 (*первый вариант*).

Необходимо рассмотреть различные величины t_0 и должны быть выполнены повторные решения уравнения (3), чтобы получить $R(t, t')$ из $J(t, t')$, в то время, как различные величины t_0 и t_i нужно рассмотреть и повторно решить уравнение (7) для получения $\zeta(t, t_0, t_i)$. Коэффициент старения $\chi(t, t')$, после определения функции релаксации $R(t, t')$, может быть определен из уравнения (6) для различных значений t' до t_0 . Для подобного объема данных могут быть легко предусмотрены средства проектирования [35,41]. Программа, вычисляющая величину ползучести (которую будет можно будет свободно загрузить с веб-сайта [creepanalysis](http://creepanalysis.com) [41], актуализируемого в настоящее время) позволяет провести непосредственное численное определение $R(t, t')$, $\zeta(t, t_0, t_i)$, $\chi(t, t')$ от первичной функции $J(t, t')$.

Сравнение тенденций применительно к времени и возрасту для диаграмм ползучести, функций релаксации и перераспределения, а также коэффициента старения, полученного для трех из моделей прогноза ACI 209 2R [1], показаны в [2,21,23]. В настоящее время проводятся сопоставления с тенденциями, вытекающими из прогностической модели Модельного Кодекса ФИБ 2010 [25] и модели B4, предложенной З.П. Базантом и его исследовательской группой [14,15,38-40].

5. Заключение

Современные железобетонные конструкции, возводимые с использованием сложных последовательных методов строительства и/или характеризующиеся значительной неоднородностью, в целом, очень чувствительны к воздействию более поздних деформаций, проявляющихся в поведении бетона, зависящего от времени (ползучесть и усадка).

Текущие согласованные международные форматы и процедуры расчета таких воздействий в конструкциях, принятые в недавних руководящих документах, рекомендациях и кодексах были проиллюстрированы в данной статье. Этот процесс гармонизации представляет собой ценный результат, частично компенсирующий сохраняющиеся расхождения и неопределенности в том, что касается создания надежных моделей прогнозирования зависящего от характера работы бетона во времени, с особым упором на ползучесть и её долгосрочные тенденции. Этот значительный результат был достигнут благодаря интенсивным дискуссиям и сотрудничеству между различными школами и учеными во всем мире, вдохновленными и продвигаемыми в течение последних четырех десятилетий международными организациями, разрабатывающими предстандарты и стандарты в области конструкционного бетона, при осуществлении координации автором.

В том, что касается точных численных расчетов по общему методу, некоторые специфические критерии и руководства по-прежнему необходимы для легкой и удобной для пользователей реализации дифференциального подхода, который должен быть увязан с результатами наиболее перспективных научных исследований. На самом деле, дифференциальный подход более выгоден и в вычислительном отношении более эффективен по, отношению к интегральному подходу при необходимости детальной оценки эффектов временной зависимости работы бетона на различных этапах строительства и при анализе долгосрочной надежности больших сложных, последовательных и высоко чувствительных к ползучести конструкций, моделируемых методом конечных элементов (МКЭ). Это позволяет, в частности, принимать во внимание влияние различных неупругих и нелинейных явлений, вызывающих отклонения от линейной теории наследственной вязкоупругости, таких как трещинообразование при растяжении, циклическая ползучесть и релаксация напряжений в преднапрягаемых арматурных эле-

ментах при переменном напряжении, а также при воздействиях влажности и температурных изменений.

Комитет ACI 209 «Ползучесть и усадка в бетоне» будет способствовать, через специальный подкомитет, разработке практических руководящих правил для этой сферы.

Список благодарностей от автора

Публикация в 2013 году в рамках нового Модельного кода ФИБ 2010 года для железобетонных конструкций [25] раздела 7.2.4 "Анализ конструктивного воздействия зависящего от времени поведения бетона" свидетельствует об успешном завершении длительного процесса международной гармонизации на мировом уровне предстандартизации критериев руководств в этой конкретной области. Автор особенно благодарен покойному Почетному члену ЕКБ и члену Академии Строительства и Архитектуры СССР Алексею Алексеевичу Гвоздеву, являвшемуся долгое время заведующим научно-исследовательской лабораторией НИИЖБ - Института бетона и железобетона, теперь названного в его честь, за его важную роль в поощрении и помощи автору, в 1960-70-е годы, на начальных этапах введения в международный предстандарт ЕКБ-ФИП (прародителей ФИБ) нового расширенного формата анализа ползучести, основанного на линейной теории наследственной вязкоупругости, в разработку которого школа советских ученых и Гвоздева сами привнесли важный вклад. Эта статья является данью уважения его памяти.

Автор также отдает дань памяти своему итальянскому маэстро Франко Леви, на протяжении длительного времени Президента ЕКБ, а затем и ФИП, за его первоначальное стимулирование создания Руководства по проектированию ЕКБ по конструктивному воздействию зависящего от времени поведения бетона [22]. Вклад С. В. Александровского, Дж. Фочарта и Д. Джангвирта в разработку первого проекта Руководства, а также Р. Наполи, Ф. Мола и М. Копрна в окончательном редактировании общепризнан. Автор также признателен Д. Каррейро, В. Дилджеру и М. Сэссоуну, членам редакционной команды сегодняшнего расширенного проекта руководящего документа ACI 209.3 R-XX «Анализ влияния ползучести и усадки в бетонных конструкциях» [2] и З.П. Базанту за его вклад в обсуждение этого документа и составлению проекта текста, основанного на дифференциальном подходе.

Наконец, автор благодарен всем ученым и исследователям, которые внесли свой вклад в обсуждение конструктивного воздействия зависящего от времени поведения бетона в течение четырех последних десятилетий в рамках ЕКБ, ФИБ и ACI, и всем коллегам по исследовательской группе «Анализ ползучести» из туринского политехнического университета, в особенности М. Сассоне и К. Казаленьо.

Библиографический список

1. ACI 209.2R-08, *Guide for Modeling and Calculation of Shrinkage and Creep in Hardened Concrete*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2008, 48 p.
2. ACI 209.3R-XX, *Analysis of Creep and Shrinkage Effects on Concrete Structures*, Chiorino M.A. (Chairm. of Edit. Team), ACI Committee 209, March 2011, Final approved draft 2013; currently under revision by ACI TAC Technical Activity Committee, 228 p.
3. Aleksandrovskii S. V., *Analysis of Plain and Reinforced Concrete Structures for Temperature and*

Moisture Effects (with Account of Creep) (in Russian), Stroyizdat, Moscow, 1966, 443 p.

4. Bazant Z.P., Numerical Determination of Long-range Stress History from Strain History in Concrete, *Material and Structures*, Vol. 5, 1972, pp. 135-141.

5. Bazant Z.P., Prediction of Concrete Creep Effects Using Age-adjusted Effective Modulus Method, *Journal of the American Concrete Institute*, V. 69, 1972, pp. 212-217.

6. Bazant Z. P., Theory of Creep and Shrinkage in Concrete Structures: a Precis of Recent Developments, *Mechanics Today*, vol.2, Pergamon Press, New York, 1975, pp. 1-93. See also: RILEM TC-69, Material Models for Structural Creep Analysis (principal author Z.P. Bazant), Chapter 2 in *Mathematical Modeling of Creep and Shrinkage of Concrete*, Z.P. Bazant, ed., J. Wiley, Chichester and New York, 1988, pp. 99-215; RILEM TC-69, Creep Analysis of Structures (principal authors Z.P. Bazant and O. Buyukozturk), Chapter 3, ibid. pp.217-273.

7. Bazant Z. P., and Baweja S., Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures - Model B3, in: A. Al-Manaseer ed., The A. Neville Symposium: *Creep and Shrinkage - Structural Design Effects*, ACI SP-194, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2000, pp. 1-83.

8. Bazant Z.P., Hubler M.H., Yu Q., Pervasiveness of Excessive Segmental Bridge Deflections: Wake-Up Call for Creep, *ACI Structural Journal*, Vol. 108, No. 6, Nov.-Dec. 2011, pp. 766-774.

9. Bazant Z. P., Li G.-H., and Yu Q., Prediction of Creep and Shrinkage and their Effects in Concrete Structures: Critical Appraisal, *Proc., 8th Int. Conf. on Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures - CONCREEP 8*, Vol. 2, T. Tanabe, et al. eds., CRC Press, Boca Raton, FL, 2009, pp. 1275–1289.

10. Bazant Z.P., and Li G.-H., Unbiased Statistical Comparison of Creep and Shrinkage Prediction Models, *ACI Materials Journal*, Vol. 105, No. 6, Nov.-Dec. 2008, pp. 610-621.

11. Bazant Z.P., and Li G.-H., Comprehensive Database on Concrete Creep and Shrinkage, *ACI Materials Journal* Vol. 105, No. 6, Nov.-Dec. 2008, pp. 635-638.

12. Bazant Z. P., and Prasannan S., Solidification Theory for Concrete Creep: I. Formulation, *Journal Eng. Mech.*, 115(8), 1989, pp. 1691–1703.

13. Bazant Z. P., and Prasannan S., Solidification Theory for Concrete Creep: II. Verification and Application, *Journal Eng. Mech.*, 115(8), 1989, pp. 1704–1725.

14. Bazant Z. P., Yu Q., and Li G.-H., Excessive Long-Time Deflections of Prestressed Box Girders. I: Record-Span Bridge in Palau and Other Paradigms, *ASCE Journal. of Structural Engineering*, Vol. 138, No. 6, June 2012, pp. 676-686.

15. Bazant Z. P., Yu Q., and Li G.-H., Excessive Long-Time Deflections of Prestressed Box Girders. II: Numerical Analysis and Lessons Learned, *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 138, No. 6, June 2012, pp. 687–696.

16. Casalegno C., Sassone M., Chiorino M. A., Time-dependent Effects in Cable-stayed Bridges Built by Segmental Construction, *Proc. of Third International fib Congress incorporating the PCI Annual Convention and Bridge Conference*. Washington D. C., 2010, pp. 539-554.

17. Casalegno C., Sassone M., Chiorino M. A., Time-dependent Effects in Concrete Structures: a General Computational Approach, *Proc. of Structural Engineers World Congress SEWC 2011*, Como, Italy, (CD).

18. CEB, Comite Eurointernational du Beton and Federation Internationale de la Precontrainte, *International System of Unified Standard Codes of Practice for Structures, Vol. II, CEB-FIP Model Code for Concrete Structures*, CEB Bulletin d'Information N° 124/125-E-F, 1978, 348 p.

19. CEB, CEB-FIP Model Code 1990, CEB Bulletin d'Information No. 213/214, Comite Euro-International

du Beton, Lausanne, Switzerland, 1993, 437 p.

20. Chiorino M.A., A Rational Approach to the Analysis of Creep Structural Effects, in J. Gardner & J. Weiss (eds). *Shrinkage and Creep of Concrete*, ACI SP-227, 2005, pp.107-141.

21. Chiorino M.A. and Carreira D. J., Factors Affecting Shrinkage and Creep of Hardened Concrete and Guide for Modelling - A State-of-the-art Report on International Recommendations and Scientific Debate, *The Indian Concrete Journal*, Vol. 86, No. 12, December 2012, pp. 11-24. Errata, Vol. 87, No. 8, August 2013, p.33. Chiorino M.A. and Casalegno C., Evaluation of the Structural Response to the Time-dependent Behaviour of Concrete: Part 1 - An Internationally Harmonized Format, *Ibidem*, pp. 25-36.

22. Chiorino M.A. (Chairm. of Edit. Team), Napoli P., Mola F., and Koprna M., *CEB Design Manual on Structural Effects of Time-dependent Behaviour of Concrete*, CEB Bulletin d'Information N° 142-142 Bis, Georgi Publishing Co., Saint-Saphorin, Switzerland, March 1984, 391 p.

23. Chiorino M.A. and Sassone M., Further Considerations and Updates on Time-dependent Analysis of Concrete Structures, in *Structural Concrete - Textbook on behaviour, design and performance*, 2nd edition, Vol. 2, Section 4.16, fib Bulletin 52, International Federation for Structural Concrete, Lausanne 2010, pp. 43-69.

24. EN 1992-2 Eurocode 2: *Design of Concrete Structures - Part 2: Concrete Bridges, Design and Detailing Rules*, Appendix KK, *Structural effects of time dependent behaviour of concrete*, 2005, pp. 63-67.

25. *fib, Model Code for Concrete Structures 2010*, Ernst & Sohn, 2013, 402 p.; see also Muller H. S. (Convener), *Code-type models for structural behaviour of concrete: Background of the constitutive relations and material models in the fib Model Code for Concrete Structures 2010*, State-of-art report, fib Bulletin No. 70, 196 p., November 2013.

26. Gvozdev A. A., Creep of Concrete (in Russian), *Proc. of the 2nd National Conference on Theoretical and Applied Mechanics. Mechanics of Solids, Mekhanika Tverdogo Tela*, Acad. of Sciences USSR, 1966, Moscow, pp. 137-152. (French translation: Le Fluage du Beton, CEB Bulletin N° 64, 1967).

27. Gvozdev A. A., Galustov K. Z., and Yashin A. V., On some deviations from the superposition principle in creep theory (in Russian), *Beton i Zhelezobeton*, 13(8), 1967,

28. Jirasek M. & Bazant Z.P., *Inelastic Analysis of Structures*, Wiley and Sons, 2002, 734 p.

29. Levi F., Sugli Effetti Statici dei Fenomeni Viscosi (On the Structural Effects of Viscous Phenomena, in Italian), *Rendiconti Accademia Nazionale dei Lincei*, Serie VIII, Vol. IV, fasc.3, pp. 306-311, fasc. 4, 1948, pp. 424-427.

30. Levi, F. and Pizzetti G., *Fluage, Plasticite, Precontrainte*, Dunod, Paris, 1951, 463 p.

31. McHenry D., A New Aspect in Creep of Concrete and its Application to Design, *Proc. ASTM*, Vol. 43, 1943, pp. 1069-86.

32. Maslov G. N., Thermal Stress States in Concrete Masses, with Account of Concrete Creep (in Russian), *Izvestia NIIG*, 28, 1941, pp.175-188.

33. Salencon J., *Viscoelasticite pour le Calcul des Structures*, Les Editions de l'Ecole Polytechnique, Les Presses des Ponts et Chaussees, Paris, 2009.

34. Sassone, M. and Casalegno, C., Evaluation of the Structural response to the Time-dependent Behaviour of Concrete: Part 2 - A General Computational Approach, *The Indian Concrete Journal*, Vol. 86, No. 12, December 2012, pp. 39-51. Errata, Vol. 87, No. 8, August 2013, p. 33.

35. Sassone M. and Chiorino M. A., Design Aids for the Evaluation of Creep Induced Structural Effects, in J. Gardner & J. Weiss (eds). *Shrinkage and Creep of Concrete*, ACI SP-227, 2005, pp. 239-259.

36. Volterra V., Sulle Equazioni Integro-Differenziali della Teoria della Elasticita (Integral-Differential Equations of the Theory of Elasticity, in Italian), *Rendiconti Accademia Nazionale dei Lincei*, Vol. XVIII, 2°

Sem., 1909, pp. 295-301. See also: Volterra V., Sur les Equations Integro-Differentielles et leurs Applications, *Acta Mathematica*, G. Mittag-Leffler Ed., Stockholm, 1912, pp. 295-350 ; Volterra V., *Lecons sur les Fonctions de Lignes*, Gauthier-Villars, Paris, 1913, 230 p.

37. Yu Q., Bazant, Z.P. and Wendner R., Improved Algorithm for Efficient and Realistic Creep Analysis of Large Creep-Sensitive Concrete Structures, *ACI Structural Journal*, Vol. 109, No. 5, Sept-Oct. 2012, pp. 665-675.

38. Wendner, R., Hubler, MH, and Bazant, ZP., Optimization Method, Choice of Form and Uncertainty Quantification of Model B4 Using Laboratory and Multi-Decade Bridge Databases, *Material and Structures*, Vol. 48(4), 2015, pp. 771-796.

39. Wendner, R., Hubler, M.H., and Bazant, Z.P. (2015). Statistical Justification of Model B4 for Multi-decade Concrete Creep Using Laboratory and Bridge Data Bases and Comparisons to other Models, *Material and Structures*, Vol. 48(4), 2015, pp. 815-833.

40. RILEM Technical Committee TC-242-MDC (Z.P.Bazant, chair), RILEM draft recommendation: TC-242-MDC Multi-decade Creep and Shrinkage of Concrete: Material Model and Structural Analysis. Model B4 for Creep, Drying Shrinkage and Autogenous Shrinkage of Normal and High-Strength Concretes with Multi-Decade Applicability, *Material and Structures*, Vol. 48(4), 2015, pp. 753-770.

41. Creepanalysis, www.polito.it/creepanalysis, DISEG Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Politecnico di Torino (currently under revision; reference should be made to new version to be edited in 2018).

Автор:

Марио Альберто КИОРИНО, Почетный профессор структурного анализа, Политехнический Университет Турина; Национальный член Туринской академии наук; Почетный член Американского института бетона. Председатель комитета ACI 209 «Ползучесть и усадка в бетоне», г. Турин, Италия
e-mail: mario.chiorino@polito.it