

Н.Б. АНДРОСОВА^{1,2}

¹ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орел, Россия

²ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», г. Москва, Россия

НЕРАВНОВЕСНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ОЦЕНКЕ ПОТЕНЦИАЛА ЖИВУЧЕСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ СИСТЕМ: АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Аннотация. Представлен обзор научных исследований, связанных с вопросами оценки потенциала живучести железобетонных конструктивных систем с учетом неравновесных и нелинейных процессов. Особое внимание в научном обзоре уделено анализу работ, относящихся к теории ползучести бетонных и железобетонных строительных конструкций зданий и сооружений. Систематизированы основные разновидности феноменологической теории ползучести и дана их классификация. Значимость предлагаемого научного обзора состоит в том, что представлены основные достоинства и недостатки существующих феноменологических теорий ползучести бетона применительно к расчету железобетонных конструктивных систем с учетом неравновесных и нелинейных процессов.

Ключевые слова: прогрессирующее обрушение, потенциал живучести, железобетонные конструкции, ползучесть, особое воздействие.

N.B. ANDROSOVA^{1,2}

¹Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia

²Scientific and Research Institute of construction physics of RAASN, Moscow, Russia

NON-EQUILIBRIUM AND NONLINEAR PROCESSES IN SURVIVABILITY POTENTIAL EVALUATION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURAL SYSTEMS: ANALYTICAL REVIEW

Abstract. A review of scientific research related to the limitation of the right to life of reinforced concrete structural systems, taking into account incompatible and non-linear processes. Particular attention in the scientific review is devoted to the analysis of the work necessary to study the use of concrete and reinforced concrete building structures of buildings and structures. The fundamental phenomenological theory of creep is systematized and given from the classification. The significance of the proposed scientific review lies in the fact that there is a high value and transience of phenomenological theories of concrete creep, primarily for the calculation of reinforced concrete structural systems, taking into account non-equilibrium heavy and nonlinear processes.

Keywords: progressive collapse, survivability potential, reinforced concrete structures, creep, accidental action.

Введение

Под термином живучесть конструктивной системы в научных публикациях нет установившегося определения и используются несколько различающиеся определения. Так, профессор В.Д. Райзер [1] определяет живучесть как свойство конструкций сохранять при аварийных воздействиях способность к выполнению основных функций, не допуская лавинообразного (каскадного) развития возмущений и отказов.

© Андросова Н.Б., 2022

Профессор Ю.П. Назаров [2] предлагает определять живучесть как свойство сохранять общую несущую способность при локальных разрушениях, вызванных природными и техногенными воздействиями, по крайней мере, в течение некоторого времени.

Профессоры В.М. Бондаренко, В.И. Колчунов [3] определяют живучесть как способность системы распределять нагрузку между остальными элементами в случае повреждения или ослабления одного из элементов (коррозия, внезапное выключение «лишних» элементов статически неопределимых схем).

Однако все эти определения подразумевают оценку живучести для вновь проектируемых конструкций, живучесть которых рассчитывается без учета эксплуатационного накопления повреждений, и соответственно, изменений несущей способности сечений конструктивных элементов во времени при различной величине эксплуатационной нагрузки и режимах ее приложения. Для учета этих особенностей эксплуатируемых конструкций при расчете реконструируемых объектов в [3] предложено, наряду с понятием «живучесть», ввести дополнительно понятие «экспозиция живучести». Под ним подразумевается при неравновесной постановке задачи (наложение во времени деформаций ползучести и коррозионных повреждений) продолжительность сохранения потенциала живучести строительной системы во времени разрушительным воздействиям агрессивной среды с выключением из системы конструктивных элементов, ответственных за геометрическую неизменяемость сооружения.

Введение этого понятия позволяет производить защиту конструктивной системы от прогрессирующего обрушения для реконструируемых зданий и сооружений, в которых при их эксплуатации появились деформации ползучести и коррозионные повреждения. При этом, следуя [3], должен быть выполнен расчет по оценке режимных неравновесных процессов деформирования железобетонных конструктивных систем во времени.

Неравновесные процессы деформирования железобетонных конструкций, используемые для оценки живучести при длительном нагружении.

Проблема расчета нелинейно-деформированного железобетона как двухкомпонентного материала с нарушением сплошности при длительном действии нагрузок до настоящего времени остается недостаточно изученной, не смотря на то, что железобетон является основным конструкционным материалом для зданий и сооружений различного назначения. Все существующие сегодня теории носят феноменологический характер и относительно удовлетворительно описывают длительное деформирование таких конструкций фрагментарно и далеко не охватывают все разнообразие видов напряженного состояния, граничных условий, воздействий и применяемых типов конструкций. При особом предельном состоянии, недавно введенном в практику проектирования в соответствии с новыми нормативными документами [4, 5, 6], деформирование железобетонных конструкций учеными предложено рассматривать с позиции живучести строительных систем зданий и сооружений [7-10]. В то же время приведенные в этих нормах положения расчета относятся к вновь проектируемым конструкциям и не учитывают накопившиеся в период эксплуатации износ и повреждения элементов конструктивных систем.

Важной составляющей при оценке продолжительности сохранения потенциала живучести железобетонных конструктивных систем во времени разрушительным воздействиям агрессивной среды с выключением из системы конструктивных элементов, ответственных за геометрическую неизменяемость, является учет неравновесных процессов длительного деформирования железобетонных конструкций.

Неравновесные процессы силового сопротивления бетона, эволюционирующие во времени, имеют силовой и несиловой характер происхождения. Ползучесть характеризуется, как явление прироста при $\tau > t_0$ начальной деформации, порожденной нагружением в момент $\tau = t_0$.

Неравновесные процессы силового происхождения при деформировании характеризуются полными деформациями ползучести (1):

$$\varepsilon_{ins} = \varepsilon_{c1} + \varepsilon_{c2}, \quad (1)$$

где ε_{c1} - мгновенные (быстронатекающие) деформации ползучести; ε_{c2} - длительные (запоздалые) деформации ползучести.

Анализ теоретических исследований оценки ползучести бетона для оценки живучести конструктивных систем.

Теорией ползучести строительных материалов занималось большое количество российских и зарубежных ученых. Среди из наиболее значимых можно отметить работы: Арутюняна Н.Х. [11], Александровского С.В. [12], Бондаренко В.М. [13], Васильева П.И. [14], Гвоздева А.А. [15], Маслова Г.Н. [16], Прокоповича И.Е. [17], Работнова Ю.Н. [18], Ржаницына А.Р. [19], Санжаровского Р.С. [20], Улицкого И.И. [21], Харлаба В.Д. [22], Vařant Z.P. [23], Gilbert R.I. [24], Named E. [25] и др.

Ползучесть бетона развивается не только при сжатии, но и при растяжении, изгибе и кручении. Однако наиболее изучена ползучесть бетона при сжатии. Данные опытов [26, 27, 28, 29] говорят, что в общем случае бетону характерна нелинейность длительного деформирования. Например, при сжатии при относительно низких уровнях нагрузки связь между напряжениями и деформациями ползучести достаточно близка к линейной. По мере роста нагрузки ползучесть приобретает все более ярко выраженный нелинейный характер. Эти же данные свидетельствуют и о весьма широком диапазоне изменения ползучести бетона. Например, в реальных условиях даже при относительно невысоких (эксплуатационных) нагрузках деформации ползучести могут в два-три раза превышать упругие, возникшие в момент нагружения образца, а при высоких нагрузках, на подходе к разрушению – в 6-8 раз и даже более.

В настоящее время не существует единой теории ползучести, пригодной для всех материалов. Да и вряд ли они возможны на нынешнем уровне развития физики материалов, так как законы ползучести для различных материалов различны вследствие самой природы тех физических процессов, которые лежат в основе свойств этих материалов.

Поэтому при построении вариантов феноменологической теории ползучести бетона важно, чтобы исходные уравнения (2), достаточно полно отражали основные свойства явлений ползучести бетона в наиболее характерных режимах нагружения. В тоже время в конкретных приложениях они приводили и к возможности постановки определенных реальных краевых задач, допускающих эффективные решения.

$$\varepsilon_b = \varepsilon_{b,el} + \varepsilon_{c2} = \frac{\sigma_b}{E_b} + \frac{f(\sigma_b)}{E_b} \varphi_t + \frac{1}{E_b} \int_0^1 \left[\frac{d\sigma_b(\tau)}{d\tau} + \frac{df[\sigma_b(\tau)]}{d\tau} \varphi_{t,\tau} \right] d\tau. \quad (2)$$

Каркасом феноменологической теории ползучести бетона, как и любого другого материала, является соотношение между напряжениями и деформациями. Отличие от различных вариантов теории друг от друга определяется видом соотношений между напряжениями и деформациями и их функциональным характером. Галустовым К.З. показано [30], что точность феноменологических теорий ограничивается точностью принятых допущений (гипотез), которые по мере накопления новых экспериментальных данных уточняются или отвергаются.

В основу практически всех существующих феноменологических теорий положены следующие гипотезы: бетон рассматривается как изотропный материал; при эксплуатационной нагрузке связь между деформациями бетона и вызвавшими их напряжениями – линейная; к деформациям ползучести бетона применим принцип наложения воздействий (принцип суперпозиций). В исследованиях [30] доказано, что первая гипотеза о изотропности бетона носит условный характер, т.к. хаотическое расположение заполнителя в бетоне больших объемов позволяет считать его однородным. Вторая гипотеза о линейной зависимости деформаций подтверждается экспериментально при нагрузках сжатия не

превышающих 0,4 от призмной прочности бетона. Третья гипотеза о принципе наложения воздействий подтверждена для ступенчато-возрастающей нагрузки, но приводит к существенным погрешностям при переменных воздействиях нагрузки (с разгрузками).

Профессором Гвоздевым А.А. было показано [31], что на деформацию ползучести в наибольшей степени влияют напряжения, действовавшие в молодом возрасте, а также напряжения, имевшие место незадолго до момента наблюдения. Этот последний эффект надо целиком отнести к последствию, в известной мере стирающему влияние давнишних воздействий, но еще не имеющему времени для того, чтобы оказать смягчающее влияние на напряжения, которые прикладывались совсем недавно. При различных размерах тел деформация ползучести при прочих равных условиях больше у малых тел, чем у больших. С повышением напряжений, как известно, деформации ползучести растут быстрее напряжений, вызывая перераспределение напряжения в сечениях, а также и изменение усилий в статически неопределимых конструкциях. В статически неопределимых конструкциях нелинейная ползучесть участков растянутой зоны с приближением к моменту образования трещин, равно как и сильное напряжение участков сжатой зоны, тоже вызывают перераспределение усилий.

Профессорами Голышевым А.Б., Колчуновым Вл.И. систематизированы основные разновидности феноменологической теории ползучести и классифицированы следующим образом [32]:

- наследственная теория старения (теория упруго-ползучего тела) – НТС;
- теория упругой наследственности – ТУН;
- теория старения ТС.

Наследственная теория старения наиболее полно описывает развитие деформаций ползучести во времени, учитывая (в той или иной степени) как явление старения, так и упругой наследственности, т.е. частичного восстановления деформаций ползучести после снятия нагрузки. Но эта теория и самая сложная для практического использования, особенно если иметь в виду количество опытных параметров, которые пришлось бы нормировать при разработке соответствующих пособий и рекомендаций.

Поскольку теория упругой наследственности постулирует полную обратимость деформаций ползучести, а это означает, физически, что имеется в виду бетон с характеристиками, инвариантными относительно абсолютного значения времени наблюдения (в соответствии с этим в этой теории принимается, что $E_b(\tau) = E_b = const$), указанная теория применима лишь к «старому» высохшему или невысыхающему бетону.

Влияние старения бетона на ползучесть в теории старения учитывается принятием гипотезы о параллельности кривых ползучести, тогда как в наследственной теории старения это учитывается функцией $\theta(\tau)$.

Таким образом, теория старения не обладает достаточной общностью для описания процессов деформирования упруго-наследственного материала, в частности бетона, свойства которого изменяются во времени. Недостатки теории старения проявляются при возрастающих нагрузках и особенно сильно – при повторных нагрузках и разгрузках. Вопреки экспериментам, по этой теории получается полная необратимость деформаций ползучести и, как следствие, отсутствие процесса восстановления напряжений. В итоге это приводит к интенсификации процесса релаксации, особенно при заружении бетона в молодом возрасте.

Вместе с тем, теория старения (даже в ее рассматриваемом – классическом варианте) может дать приемлемые результаты для решения задач теории ползучести, связанных с непродолжительными интервалами времени наблюдения или с рассмотрением длительных результатов кратковременных однократных (импульсных) воздействий (отпуск и потери напряжений арматуры, однократная осадка опор, влажностные воздействия и другое).

Основным достоинством теории старения является возможность получать расчетные формулы, содержащие непосредственно характеристику ползучести φ_t без предварительного выбора выражения для аналитического описания этой функции. И это сыграло свою роль при разработке прикладных методов учета ползучести на работу железобетонных стержневых систем.

Из сказанного следует, что хотя из всех рассмотренных выше разновидностей современной феноменологической теории ползучести наибольшей общностью и полно описывающей поведение бетона обладает наследственная теория старения (Маслова-Арутюняна), самой удобной для практического использования является теория старения. Поэтому очень важно попытаться, сохранив преимущества выражения (3), качественно уточнить последнее с тем, чтобы устранить полностью или в значительной степени его недостатки.

$$\varepsilon_b(t) = \frac{\sigma_b}{E_b} + \sigma_b C_t + \int_0^t \frac{d\sigma_b}{d\tau} \delta(t, \tau) d\tau, \quad (3)$$

где $\delta(t, \tau) = \frac{1}{E_b(\tau)} + C_t - C_\tau$.

В этом направлении заслуживает внимания так называемая «модернизированная» теория старения – МТС [32], учитывающая частичную обратимость деформаций ползучести.

Профессором Р.С. Санжаровским отмечено [33], что в теории ползучести железобетонных конструкций последовательно рассматриваются три основных проблемы. Первая проблема состоит в построении уравнений ползучести бетона при переменных (режимных) нагружениях. Вторая – в получении решения уравнения ползучести. Третья проблема заключается в расчете железобетонных конструкций при длительном нагружении, в том числе и при рассматриваемом нами особом воздействии. Им приведен анализ теории расчета железобетона, разделяемый как бы на две части – кратковременного и длительного силового сопротивления. В тоже время, в недавних работах автора [34, 35] отмечаются выявленные, по его мнению, ошибки в основах современной теории ползучести железобетона, вызванные с использованием принципа наложения, являющегося расширительным толкованием принципа (схемы) линейной суперпозиции Больцмана. Это толкование возникает вследствие следующих обстоятельств: учета явления старения бетона; изменения кратковременных свойств бетона с возрастом τ к моменту его нагружения; нелинейности деформации ползучести, начиная с самых низких уровней нагружения; использования «цепных моделей» в виде последовательного соединения нескольких тел, к примеру – теория Маслова, теория старения, вязкий элемент; присовокупления кратковременных свойств бетона к свойствам его ползучести; расширительного толкования функции податливости при различных ядрах. В международных нормах ползучесть железобетона [36] учитывается только в виде линейной ползучести бетона и мгновенных линейных свойств, их авторы называют свои разработки «новым передовым форматом, разработанным в последние десятилетия международными институтами стандартизации». Однако эти оценки формата ошибочны. По данным Еврокода, кратковременная диаграмма бетона « σ - ε » имеет ниспадающий участок и ограниченную протяженность, а ползучесть бетона нелинейна. Основоположники теории – А.А. Гвоздев, Н.Х. Арутюнян, С.В. Александровский, П.И. Васильев – неоднократно указывали, что деформации ползучести бетона нелинейно зависят от напряжений, начиная с самых низких их уровней. Дополняют результаты анализа потери мгновенной нелинейности и принципа наложения при ползучести бетона.

Профессорами Ларионовым Е.А. и Римшиным В.И. предложена модификация принципа суперпозиции Л. Больцмана, позволяющая применять его при нелинейной зависимости деформаций ползучести от напряжений [37]. Согласно концепции статистического распределения прочностей звеньев и линейной зависимости деформаций от структурных напряжений выведено реологическое уравнение механического состояния.

Принцип наложения заключается в суммировании в некоторый момент времени частичных приращений деформаций, порожденных последовательными предыдущими приращениями напряжений. Полное приращение деформации ползучести при условии взаимонезависимости частичных приращений определяется их суммой, согласно известному в теории линейной ползучести принципу суперпозиции Л. Больцмана. Это условие необходимо для применимости принципа наложения как принципа линейной суперпозиции. Полная деформация при одноосном нагружении представляет сумму мгновенной деформации и деформации ползучести, определяемых наряду с нагружением модулем упругости и мерой ползучести соответственно. Выделение в некоторых работах части мгновенной деформации, отвечающей эволюции модуля упругости, влечет такое представление уравнения состояния, которое позволяет делать ошибочные выводы при его некорректной интерпретации.

Профессором Named [25] выполнены исследования нелинейного вязкоупругого поведения железобетонных балок при длительном нагружении. Ученым была разработана теоретическая модель, основанная на вязкоупругом модифицированном принципе суперпозиции, учитывающая трещинообразование, нелинейное поведение бетона при сжатии, усадке, старении и явление разрушения при ползучести. Представлена нелинейная форма модуля релаксации, которая вводится в определяющие соотношения и соответствующую нелинейную реологическую модель Максвелла для учета поврежденности. Основные уравнения решаются путем численного интегрирования с шагом во времени, что дает экспоненциальный алгоритм, следующий за разложением модуля релаксации в ряд Дирихле. Определение жесткости, эквивалентной сечению, и деформаций ползучести вдоль областей с трещинами и без трещин достигается с помощью итерационной процедуры на каждом временном шаге.

Известно, что деформации ползучести (приблизительно 70%) проявляются в первые 3-4 месяца с момента загрузки. В современных условиях все существующие теории ползучести носят феноменологический характер, т.е. основаны на моделировании и описании наиболее изученных экспериментальных явлений. Наличие различных теорий ползучести объясняется тем, что авторы, разделяя простую ползучесть на линейную и нелинейную, используют различные подходы к описанию составляющих. Во всех уравнениях ползучести есть общая количественная оценка деформаций ползучести (учет длительного нагружения) - мера ползучести $C(t, t_0)$. Это – общепринятый параметр линейной ползучести и определяется он как отношение деформаций ползучести к напряжению, при которых происходит эта ползучесть (4):

$$C_{t,t_0}(b) = \frac{\varepsilon_{ins}(t)}{\sigma_b} = \frac{\varepsilon_{c1} + \varepsilon_{c2}}{\sigma_b} \quad (4)$$

Мера деформаций ползучести $C(t, t_0)$ к моменту наблюдения t бетона некоторого состава зависит от двух факторов: возраста в момент начала нагружения t_0 и продолжительности нагружения $t-t_0$ [26, 27].

Ползучесть железобетона. Рассмотренные расчетные модели оценки ползучести применимы к бетонным конструкциям. Совсем иное распределение усилий и напряжений происходит в железобетонных конструкциях как в двухкомпонентном материале. Так, стальная арматура препятствует свободному проявлению ползучести бетона под нагрузкой, является внутренней связью.

К настоящему времени для железобетонных конструкций предложены различные решения, с учетом режимов и особенностей деформирования. В исследованиях [38] один из основных вопросов касался изучения учета истории возведения и нагружения (старение; изменение мгновенного модуля упругости с течением времени; релаксация напряжения, вызванная деформацией ползучести) монолитных железобетонных рам и безригельных каркасов. Предложенный подход позволил уточнить реальное распределение внутренних усилий в конструкциях из монолитного железобетона, особенно возводимого в короткие

сроки. Как известно, чем позже загружается образец, тем слабее проявляется ползучесть (до двух раз при бесконечно большом t_0 и наоборот). В основу расчётов монолитных рам и безригельных каркасов с учетом ползучести, выполненных в названной работе, заложена теория линейной ползучести стареющего материала Г.Н. Маслова, Н.Х. Арутюняна, обоснование которой дано в работе Арутюняна [11] и построена на следующих предпосылках:

- материал рассматривается как однородное изотропное тело;
- между напряжениями и деформацией ползучести выполняется линейная зависимость;
- для деформации ползучести применим принцип наложения воздействий.

С позиции оценки живучести сооружений интерес представляет исследование профессоров Травуша В.И. и Мурашкина В.Г., в котором рассмотрено изменение деформаций и напряжений в изгибаемом железобетонном элементе при воздействии внешней нагрузки, как и при кратковременном, так и при длительном нагружении процессе с учетом временного фактора [39]. Показано, что в процессе эксплуатации железобетонных конструкций происходит изменение модуля упругости бетона относительно начального значения и одновременно, даже при неизменной нагрузке, происходит нарастание деформаций железобетонных конструкций, вызванное явлением ползучести. Зависимость характеристик деформирования железобетона под нагрузкой получена при разбивке процесса деформирования элемента на малые периоды времени. Методика позволяет прогнозировать состояние деформационных и прочностных характеристик в изгибаемой железобетонной конструкции в любой конкретный момент времени. Для оценки состояния сооружений в режиме эксплуатации необходимо знать начальные параметры бетона и арматуры, время эксплуатации и степень агрессивного воздействия внешней среды на сооружение.

Экспериментальными исследованиями о характере деформирования железобетона во времени и временном характере перераспределения напряжений между арматурой и бетоном занимался Галустов К.З. [30]. Им предложен метод прогнозирования перераспределения напряжений между бетоном, арматурой и герметичной облицовкой применительно к железобетонным энергетическим сооружениям.

Вариант учета деформаций ползучести при расчете железобетонных конструкций на основе принципа разделения полных деформаций бетона на обратимые и необратимые рассмотрен и в исследованиях [40]. Здесь предложено реологическое уравнение для железобетонного элемента конечных размеров взамен реологического уравнения бетонного волокна. Это сняло проблему с принципом суперпозиции, проблему неконсервативности процесса деформирования, а также существенно упростило расчетный аппарат. Таким способом возможно определить деформации бетонного волокна при простом (однородном) нагружении. Однако попытки распространения полученных результатов на неоднородное напряжено-деформированное состояние конструкции не позволяют пока выстроить относительно обозримую практическую методику инженерного расчета. По-видимому, по этой причине действующие в стране нормы проектирования учитывают ползучесть путем уменьшения модуля деформаций бетона в $(1+\varphi)$ раз, где φ – предельная характеристика ползучести. Такой прием не учитывает режим нагружения конструкции и, как правило, завышает величины деформаций.

Известно, что при длительном нагружении во времени в железобетонных конструкциях происходит перераспределение напряжений и усилий между бетоном и арматурой. При одних напряженных состояниях это благоприятно отражается на работе железобетонных конструкций, при других – наоборот.

В частности, в изгибаемых элементах под влиянием ползучести бетона сжатые волокна будут сокращаться во времени, а растянутые – удлиняться. В статически неопределимых конструктивных системах каркасов зданий ползучесть играет положительную роль, смягчая концентрацию напряжений, вызывая перераспределение силовых потоков, «смягчая» последствия особого воздействия.

Выводы

При решении задач, связанных с оценкой экспозиции живучести и защитой от прогрессирующего обрушения реконструируемых зданий и сооружений следует учитывать длительность эксплуатации строительных конструкций и степень коррозионного повреждения во времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Райзер В.Д. К проблеме живучести зданий и сооружений // Строительная механика и расчет сооружений. 2012. № 5. С. 77-78.
2. Назаров Ю.П., Городецкий А.С., Симбиркин В.Н. К проблеме обеспечения живучести строительных конструкций при аварийных воздействиях // Строительная механика и расчет сооружений. 2009. № 4. С. 5-9.
3. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Концепция и направления развития теории конструктивной безопасности зданий и сооружений при силовых и средовых воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 2. С. 28-31.
4. Федеральный закон «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» от 30.12.2009. № 384.
5. СП 296.1325800.2017 «Здания и сооружений. Особые воздействия».
6. СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения».
7. Колчунов В.И., Ключева Н.В., Андросова Н.Б., Бухтиярова А.С. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях. М.: Издательство АСВ, 2016. 208 с.
8. Травуш В.И., Федорова Н.В. Живучесть конструктивных систем сооружений при особых воздействиях // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 5. С. 73-80. doi:10.18720/МСЕ.81.8
9. Колчунов В.И., Тамразян А.Г. Основные направления развития теории конструктивной безопасности и синтеза железобетонных конструкций зданий и сооружений // Бетон и железобетон – взгляд в будущее: научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону (Москва, 12-16 мая 2014 г.): в 7 т. Т.7. Пленарные доклады. Москва: МГСУ, 2014. С. 176-191.
10. Краснощеков Ю.В. Живучесть зданий со сборными железобетонными перекрытиями // Вестник СибАДИ. 2017. № 4-5. С. 107-116.
11. Арутюнян Н.Х., Колмановский В.Б. Теория ползучести неоднородных тел. М.: Наука, 1983. 336 с.
12. Александровский С.В., Васильев П.И. Экспериментальные исследования ползучести бетона // Ползучесть и усадка бетона и железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1976. С. 97–152.
13. Бондаренко В.М., Бондаренко С.В. Инженерные методы нелинейной теории железобетона. М.: Стройиздат, 1982. 287 с.
14. Васильев П.И., Лившиц Я.Д. Приложение теории ползучести бетона к расчетам конструкций и мостов // Ползучесть и усадка бетона и железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1976. С. 268.
15. Гвоздев А.А., Яшин А.В., Петрова К.В. и др. Прочность, структурные изменения и деформации бетона. М.: Стройиздат. 1978. 299 с.
16. Маслов Г.Н. Термическое напряженное состояние бетонных массивов при учете ползучести бетона // Известия ВНИИГ. 1941. Т. 28. С. 175-183.
17. Прокопович И.Е., Зедгенидзе В.А. Прикладная теория ползучести, М., Стройиздат, 1980. 240 с.
18. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752 с.
19. Ржаницына А.Р. Теория ползучести. М.: Стройиздат, 1968. 416 с.
20. Санжаровский Р.С. Нелинейная наследственная теория ползучести // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2014. № 1. С. 63–68.
21. Улицкий И.И. Определение величин деформаций ползучести и усадки бетонов. Киев.: Госстройиздат УССР, 1963. 132 с.

22. Харлаб В. Д. Принципиальные вопросы линейной теории ползучести (с привязкой к бетону): монография / В.Д. Харлаб. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2014. 212 с. URL: <https://www.iprbookshop.ru/33300.html>
23. Bažant Z.P., Prasannan S. Solidification theory for concrete creep, I: Formulation // Eng. Mech. ASCE, 115:8. 1989. P. 1691–1703.
24. Gilbert R.I. Creep and Shrinkage Models for High Strength Concrete – Proposals for Inclusion in AS3600 // Australian Journal of Structural Engineering. 2002. No. 4 (2). P. 95–106.
25. Hamed E. Nonlinear creep response of reinforced beams // Journal of mechanics of materials and structures. 2012. Vol. 7. No. 5. P. 435–460. doi:doi.org/10.2140/jomms.2012.7.435
26. Галустов К.З. Некоторые представления о ползучести бетона // Строительные материалы. 2008. № 5. С. 66–67.
27. Александровский С.В., Васильев П.И. Экспериментальные исследования ползучести бетона и железобетона конструкций. М.: Стройиздат, 1976. С. 90–152.
28. Арутюнян Н.Х. Некоторые вопросы теории ползучести. М.: Гостехиздат, 1952. 324 с.
29. Прокопович И.Е. Влияние длительных процессов на напряженное и деформированное состояние сооружения. М.: Госстройиздат, 1963. 260 с.
30. Галустов К.З. Развитие теории ползучести бетона и совершенствование методов расчета железобетонных конструкций / автореферат диссертации на соискание учетной степени д.т.н., Москва, 2008.
31. Гвоздев А.А. О перераспределении усилий в статически неопределимых железобетонных обычных и предварительно напряженных конструкциях. Научное сообщение. Москва. ЦНИПС. 1955. 30с.
32. Гольшев А.Б., Колчунов Вл.И. Сопrotивление железобетона. Киев: Основа, 2009. 432 с.
33. Беглов А.Д., Санжаровский Р.С. О методах решения уравнений ползучести бетона // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2005. № 3. С. 55–63.
34. Санжаровский Р.С., Тер-Эммануильян Т.Н., Манченко М.М. Принцип наложения как основополагающая ошибка теории ползучести и стандартов по железобетону // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. Т. 14. № 2. С. 92–104. doi:[10.22363/1815-5235-2018-14-2-92-104](https://doi.org/10.22363/1815-5235-2018-14-2-92-104).
35. Санжаровский Р.С., Манченко М.М., Гаджиев М.А., Мусабаев Т.Т., Тер-Эммануильян Т.Н., Вареник К.А. Система несостоятельности современной теории длительного сопротивления железобетона и предупреждения проектировщиков // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 1. С. 3–24. doi:[10.22363/1815-5235-2019-15-1-3-24](https://doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-1-3-24)
36. EN 1992-1-2: 2004. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings (Проектирование железобетонных конструкций), 2004.
37. Ларионов Е.А., Римшин В.И., Жданова Т.В. Принцип наложения деформаций в теории ползучести // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 6. С. 483–496.
38. Фёдоров. В.С., Золина Т.В., Купчикова Н.В., Левитский В.Е., Завьялова О.Б. Проектирование строительных конструкций и оснований с учётом надёжности и режимных воздействий [Электронный ресурс]: монография, под общей редакцией Н.В. Купчиковой. – Электрон. текстовые данные (13,7Мб). – Астрахань: Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, 2021.
39. Травуш В.И., Мурашкин В.Г. Влияние ползучести на распределение деформаций и напряжений в изгибаемом элементе // Строительство и реконструкция. 2017. № 2. С. 57–70.
40. Назаренко В.Г., Звездов А.И., Ларионов Е.А., Квасников А.А. Концепция развития прикладной теории ползучести железобетона // Бетон и железобетон. 2020. № 2 (602). С. 8–11.

REFERENCES

1. Rajzer V.D. K probleme zhivuchesti zdaniy i sooruzhenij // Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij. 2012. No. 5. Pp. 77–78.
2. Nazarov YU.P., Gorodeckij A.S., Simbirkin V.N. K probleme obespecheniya zhivuchesti stroitel'nyh konstrukcij pri avarijnyh vozdeystviyah // Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij. 2009. No. 4. Pp.5–9.
3. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. Konceptiya i napravleniya razvitiya teorii konstruktivnoj bezopasnosti zdaniy i sooruzhenij pri silovyh i sredovyh vozdeystviyah // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2013. No. 2. Pp. 28–31.
4. Federal'nyj zakon «Tekhnicheskij reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzhenij» ot 30.12.2009. No. 384.
5. SP 296.1325800.2017 «Zdaniya i sooruzhenij. Osobyje vozdeystviya».
6. SP 385.1325800.2018 «Zashchita zdaniy i sooruzhenij ot progressiruyushchego obrusheniya».

7. Kolchunov V.I., Klyueva N.V., Androsova N.B., Buhtiyarova A.S. ZHivuchest' zdaniy i sooruzhenij pri zaproektnyh vozdeystviyah. M.: Izdatel'stvo ASV. 2016. 208 p.
8. Travush V.I., Fedorova N.V. ZHivuchest' konstruktivnyh sistem sooruzhenij pri osobyh vozdeystviyah // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. 2018. No. 5. Pp. 73-80. doi:10.18720/MCE.81.8
9. Kolchunov V.I., Tamrazyan A.G. Osnovnye napravleniya razvitiya teorii konstruktivnoj bezopasnosti i sinteza zhelezobetonnyh konstrukcij zdaniy i sooruzhenij // Beton i zhelezobetone – vzglyad v budushchee: nauchnye trudy III Vserossijskoj (II Mezhdunarodnoj) konferencii po betonu i zhelezobetonu (Moskva, 12-16 maya 2014 g.): v 7 t. T.7. Plenarnye doklady. Moskva: MGSU, 2014. Pp. 176-191.
10. Krasnoshchekov YU.V. ZHivuchest' zdaniy so sbornymi zhelezobetonnyimi perekrytiyami // Vestnik SibADI. 2017. No. 4-5. Pp. 107-116.
11. Arutyunyan N.H., Kolmanovskij V.B. Teoriya polzuchesti neodnorodnyh tel. M.: Nauka, 1983. 336 p.
12. Aleksandrovskij S.V., Vasil'ev P.I. Eksperimental'nye issledovaniya polzuchesti betona // Polzuchest' i usadka betona i zhelezobetonnyh konstrukcij. M.: Strojizdat, 1976. Pp. 97–152.
13. Bondarenko V.M., Bondarenko S.V. Inzhenernye metody nelinejnoj teorii zhelezobetona. M.: Strojizdat, 1982. 287 p.
14. Vasil'ev P.I., Livshic YA.D. Prilozhenie teorii polzuchesti betona k raschetam konstrukcij i mostov // Polzuchest' i usadka betona i zhelezobetonnyh konstrukcij. M.: Strojizdat, 1976. Pp. 268.
15. Gvozdev A.A., YAshin A.V., Petrova K.V. i dr. Prochnost', strukturnye izmeneniya i deformacii betona. M.: Strojizdat. 1978. 299 p.
16. Maslov G.N. Termicheskoe napryazhennoe sostoyanie betonnyh massivov pri uchete polzuchesti betona // Izvestiya VNIIG. 1941. T. 28. Pp. 175-183.
17. Prokopovich I.E., Zedgenidze V.A. Prikladnaya teoriya polzuchesti. M., Strojizdat, 1980. 240 p.
18. Rabotnov YU.N. Polzuchest' elementov konstrukcij. M.: Nauka, 1966. 752 p.
19. Rzhancyn A.R. Teoriya polzuchesti. M.: Strojizdat, 1968. 416 p.
20. Sanzharovskij R.S. Nelinejnaya nasledstvennaya teoriya polzuchesti // Stroitel'naya mekhanika inzhenernyh konstrukcij i sooruzhenij. 2014. No. 1. Pp. 63–68.
21. Ulickij I.I. Opredelenie velichin deformacij polzuchesti i usadki betonov. Kiev.: Gosstrojizdat USSR, 1963. 132 p.
22. Harlab V.D. Principial'nye voprosy linejnoj teorii polzuchesti (s privyazkoj k betonu): monografiya / V.D. Harlab. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj arhitekturno-stroitel'nyj universitet, EBS ASV, 2014. 212 c. URL: <https://www.iprbookshop.ru/33300.html>
23. Bažant Z.P., Prasannan S. Solidification theory for concrete creep, I: Formulation // Eng. Mech. ASCE, 115:8, 1989. Pp. 1691–1703.
24. Gilbert R.I. Creep and Shrinkage Models for High Strength Concrete – Proposals for Inclusion in AS3600 // Australian Journal of Structural Engineering. 2002. No. 4 (2). P. 95–106.
25. Hamed E. Nonlinear creep response of reinforced beams // Journal of mechanics of materials and structures. 2012. Vol. 7. No. 5. Pp. 435-460. doi:doi.org/10.2140/jomms.2012.7.435
26. Galustov K.Z. Nekotorye predstavleniya o polzuchesti betona // Stroitel'nye materialy, 2008. No. 5. Pp. 66-67.
27. Aleksandrovskij S.V., Vasil'ev P.I. Eksperimental'nye issledovaniya polzuchesti betona i zhelezobetona konstrukcij. M.: Strojizdat, 1976. Pp. 90-152.
28. Arutyunyan N.H. Nekotorye voprosy teorii polzuchesti. M.: Gostekhizdat, 1952. 324 p.
29. Prokopovich I.E. Vliyanie dlitel'nyh processov na napryazhennoe i deformirovannoe sostoyanie sooruzheniya. M.: Gosstrojizdat, 1963. 260 p.
30. Galustov K.Z. Razvitie teorii polzuchesti betona i sovershenstvovanie metodov rascheta zhelezobetonnyh konstrukcij / avtoreferat dissertacii na soiskanie uchetoj stepeni d.t.n., Moskva, 2008.
31. Gvozdev A.A. O pereraspredelenii usilij v staticheski neopredelimyh zhelezobetonnyh obychnyh i predvaritel'no napryazhennyh konstrukciyah. Nauchnoe soobshchenie. Moskva. CNIPS. 1955. 30 p.
32. Golyshev A.B., Kolchunov V.I. Soprotivlenie zhelezobetona. Kiev: Osnova, 2009. 432 p.
33. Beglov A.D., Sanzharovskij R.S. O metodah resheniya uravnenij polzuchesti betona // Stroitel'naya mekhanika inzhenernyh konstrukcij i sooruzhenij. 2005. No. 3. Pp. 55-63.
34. Sanzharovskij R.S., Ter-Emmanuil'yan T.N., Manchenko M.M. Princip nalozheniya kak osnovopolagayushchaya oshibka teorii polzuchesti i standartov po zhelezobetonu // Stroitel'naya mekhanika inzhenernyh konstrukcij i sooruzhenij. 2018. T. 14. No. 2. Pp. 92–104. doi:10.22363/1815-5235-2018-14-2-92-104.

35. Sanzharovskij R.S., Manchenko M.M., Gadzhiev M.A., Musabaev T.T., Ter-Emmanuil'yan T.N., Varenik K.A. Sistema nesostoyatel'nosti sovremennoj teorii dlitel'nogo soprotivleniya zhelezobetona i preduprezhdeniya proektirovshchikov // Stroitel'naya mekhanika inzhenernyh konstrukcij i sooruzhenij. 2019. T. 15. No. 1. Pp. 3–24. doi:10.22363/1815-5235-2019-15-1-3-24
36. EN 1992-1-2: 2004. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings (Proektirovanie zhelezobetonnyh konstrukcij), 2004.
37. Larionov E.A., Rimshin V.I., Zhdanova T.V. Princip nalozheniya deformatsij v teorii polzuchesti // Stroitel'naya mekhanika inzhenernyh konstrukcij i sooruzhenij. 2019. T. 15. No. 6. Pp.483–496.
38. Fyodorov V.S., Zolina T.V., Kupchikova N.V., Levitskij V.E., Zav'yalova O.B. Proektirovanie stroitel'nyh konstrukcij i osnovanij s uchyotom nadyozhnosti i rezhimnyh vozdeystvij [Elektronnyj resurs]: monografiya, pod obshchej redakciej N.V. Kupchikovej. – Elektron. tekstovye dannye (13,7Mb). – Astrahan': Astrahanskij gosudarstvennyj arhitekturno-stroitel'nyj universitet, 2021.
39. Travush V.I., Murashkin V.G. Vliyanie polzuchesti na raspredelenie deformatsij i napryazhenij v izgibaemom elemente // Stroitel'stvo i rekonstrukciya. 2017. No. 2. Pp. 57-70.
40. Nazarenko V.G., Zvezdov A.I., Larionov E.A., Kvasnikov A.A. Konceptsiya razvitiya prikladnoj teorii polzuchesti zhelezobetona // Beton i zhelezobeton. 2020. No. 2 (602). Pp. 8–11.

Информация об авторе:

Андросова Наталья Борисовна

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орел, Россия,
кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой строительных конструкций и материалов.
ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», г. Москва, Россия,
старший научный сотрудник.
E-mail: ramia84@rambler.ru

Information about author:

Androsova Natalia B.

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia,
candidate of technical science, docent, head of the department of building constructions and materials.
Scientific and Research Institute of construction physics of RAASN, Moscow, Russia,
starshiy nauchnyy sotrudnik.
E-mail: ramia84@rambler.ru