



РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ НА ТЕМПЕРАТУРНО- ВЛАЖНОСТНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

В. И. Корсун

*ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,
29, ул. Политехническая, г. Санкт-Петербург, Россия, 194064.*

E-mail: korsun_vi@mail.ru

Получена 22 февраля 2021; принята 26 марта 2021.

Аннотация. Представлены результаты анализа влияния повышенных температур на основные закономерности формирования НДС железобетонных конструкций зданий и сооружений. Изложены основные возможности и недостатки представленных в нормативных документах инженерных методов расчета характерных элементов железобетонных конструкций и метода расчета по нелинейной деформационной модели. Рассмотрены возможности и направления дальнейшего развития деформационных моделей железобетона применительно к обычным тяжелым и высокопрочным модифицированным бетонам в части учета основных специфических свойств железобетона: физической нелинейности деформирования, длительных процессов в бетоне, работы железобетона в условиях неодносных (одно-, двух-, трехосных) напряженных состояний с трещинами, неоднородности свойств материалов по объему конструкции, зависимости характеристик механических и реологических свойств бетона и арматуры от температуры и продолжительности нагрева, от режимов силовых и температурных воздействий, от масштабного фактора.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, бетоны, нагрев, механические и реологические свойства, характеристики, расчет, инженерные методы, деформационные модели, развитие.

РОЗВИТОК МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД НА ТЕМПЕРАТУРНО- ВОЛОГІСНІ ВПЛИВИ

В. І. Корсун

*ФДАОУ ВПО «Санкт-Петербурзький політехнічний університет Петра Великого»,
29, вул. Політехнічна, м. Санкт-Петербург, Росія, 194064.*

E-mail: korsun_vi@mail.ru

Отримана 22 лютого 2021; прийнята 26 березня 2021.

Анотація. Представлені результати аналізу впливу підвищених температур на основні закономірності формування НДС залізобетонних конструкцій будівель і споруд. Наведено основні можливості і недоліки представлених в нормативних документах інженерних методів розрахунку характерних елементів залізобетонних конструкцій і методу розрахунку по нелінійній деформаційній моделі. Розглянуто можливості і напрямки подальшого розвитку деформаційних моделей залізобетону щодо звичайних важких і високоміцних модифікованих бетонів в частині врахування основних специфічних властивостей залізобетону: фізичної нелінійності деформування, тривалих процесів в бетоні, роботи залізобетону в умовах неодновісєвих (одно-, дво-, тривісєвих) напружених станів з тріщинами, неоднорідності властивостей матеріалів по об'єму конструкції, залежності характеристик механічних і реологічних властивостей бетону і арматури від температури і тривалості нагрівання, від режимів силових і температурних впливів, від масштабного фактора.

Ключові слова: залізобетонні конструкції, бетоны, нагрівання, механічні та реологічні властивості, характеристики, розрахунок, інженерні методи, деформаційні моделі, розвиток.

DEVELOPMENT OF METHODS FOR CALCULATION OF REINFORCED CONCRETE CONSTRUCTIONS OF BUILDINGS AND STRUCTURES FOR TEMPERATURE AND HUMIDITY EFFECT

Volodymyr Korsun

Peter the Great St. Petersburg Politechnik University,

29, Polytechnic Str., St. Petersburg, Russia, 194064.

E-mail: korsun_vi@mail.ru

Received 22 February 2021; accepted 26 March 2021.

Abstract. The results of the analysis of the effect of high temperatures on the main regularities of the formation of stress-strain state of reinforced concrete structures of buildings and structures are presented. The main possibilities and disadvantages of engineering methods for calculation of the specific characteristics of elements of reinforced concrete structures and a method for calculating using a nonlinear deformation model are presented. The possibilities and directions of further development of deformation models of reinforced concrete are considered in relation to normal and high-strength modified concretes in terms of taking into account the main specific properties of reinforced concrete – physical nonlinearity of deformation, long-term processes in concrete, work of reinforced concrete under conditions of non-uniaxial (one-, two-, triaxial) stressed states with cracks, nonuniformity of the properties of materials over the volume of the structure, the dependence of the characteristics of mechanical and rheological properties of concrete and reinforcement on the temperature and duration of heating, on the modes of force and temperature effects, on the scale factor.

Keywords: reinforced concrete structures, concrete, heating, mechanical and rheological properties, characteristics, calculation, engineering methods, deformation models, development.

Введение

Большому классу конструкций зданий и инженерных сооружений свойственна работа в условиях совместных силовых и температурных воздействий. Воздействие повышенных температур на бетон обуславливает, наряду с деформациями температурного удлинения, проявление деформаций усадки, связанных со снижением влагосодержания в бетоне. При этом в условиях первого кратковременного нагрева отмечается существенное на величину до 35 % снижение прочности на осевое сжатие и растяжение, снижение начального модуля упругости бетона на 40...50 %, увеличение предельной сжимаемости на 20 % и растяжимости на 10 %. После длительного воздействия повышенных температур отмечается некоторое восстановление прочности, начального модуля упругости и дополнительное увеличение до 50 % предельной сжимаемости у тяжелого бетона средних классов прочности.

Температурно-влажностные воздействия существенно изменяют напряженно-деформиро-

ванное состояние (НДС) строительных конструкций, и особенно железобетонных. Основные особенности влияния температурно-влажностных воздействий на НДС железобетонных конструкций проявляются в следующем:

- температурные воздействия прикладываются к конструкциям односторонне, в виде температурных перепадов, что обуславливает неоднородность по объему конструкций значенных характеристик теплофизических, механических и реологических свойств материалов;
- воздействие повышенных температур оказывает существенное влияние на характеристики прочностных и деформационных свойств бетона и арматуры, способствует проявлению температурного «старения» бетона;
- деформации усадки и ползучести бетона в условиях повышенных температур кратно, в 2–3 раза превышают соответствующие деформации бетона в условиях нормальной температуры, что необходимо учитывать в расчетных моделях конструкций;

- несвободные температурные деформации обуславливают появление в статически неопределимых конструкциях «температурных» усилий, величины которых, вследствие трещинообразования и релаксации напряжений, изменяются с течением времени;
- железобетонные конструкции при неравномерном нагреве работают, как правило, с трещинами;
- температурные и влажностные деформации – объемные по своей природе, поэтому стесненное развитие указанных деформаций обуславливает возникновение в конструкциях, в общем случае, объемных (трехосных) напряженных состояний.

Современное состояние методов расчета железобетонных конструкций на температурно-влажностные воздействия

Основными нормативными документами, регулирующими вопросы проектирования железобетонных конструкций в Российской Федерации, являются [19–22]:

СП 27.13330.2017 Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур (Актуализированная редакция СНиП 2.03.04-84);

СП 21-00-00 Огнестойкость и огнесохранность железобетонных конструкций. Москва 2004;

СТО 36554501-006-2006 Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций из тяжелого бетона;

ПОСОБИЕ По расчету огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций из тяжелого бетона (к **СТО 36554501-006-2006**);

Нормы Украины **ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012 (EN 1992-1-2:2004, IDT)** [23] представлены переводом на украинский язык Еврокода 2 (**EN 1992-1-2:2004**) в сочетании с Национальным дополнением, в котором применительно к условиям воздействия повышенных температур на железобетонные конструкции представлены только корректируемые величины температурных воздействий. В остальном за основу принята методика **EN 1992-1-2:2004**.

В европейских нормах **EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design** (Еврокод 2: Проектирование железобетонных конструкций – Часть 1-2: Общие требования. Огнестойкость) [24] представлены возможности расчета железобетонных конструкций на температурные воздействия только путем корректировки с помощью соответствующих коэффициентов условий работы нормируемых значений прочности, начального модуля упругости и предельных деформаций при сжатии и растяжении для тяжелых бетонов классов по прочности до В100. При этом количественные значения характеристик свойств для бетонов классов до В60 отличаются от значений в СП 27.13330.2017, что отражает определенные различия как в составах, так и в исходном сырье для бетонов, а также определенные особенности в практике нормирования исходных значений характеристик.

В нормах всех стран влияние повышенных температур на характеристики свойств бетона учитывается с помощью системы корректирующих коэффициентов к основным (базовым) характеристикам свойств бетона при $t^0 = 20^\circ\text{C}$.

Нормы **СП 27.13330.2017** – актуализированная редакция СНиП 2.03.04-84, которым нет аналогов в других странах. Разработаны наиболее полно для тяжелых бетонов классов по прочности до В60. Для бетонов более высоких классов характеристики физико-механических и реологических свойств в этом документе отсутствуют вследствие недостаточной изученности.

Ограничения в методике норм СП 27.13330.2017 [19]:

- рассматриваются только два расчетных температурных режима: первый кратковременный нагрев и длительный нагрев при расчетной температуре, для которого характерна стабилизация характеристик свойств до постоянных значений; случай остывания после длительного нагрева может быть смоделирован в работе только в части учета необратимых деформаций температурной усадки бетона и связанных с ними напряжений (усилий);
- полагается, что в остывшем после нагрева состоянии характеристики свойств равны таким же, как и в нагретом (это нуждается в

проверке, так как остывание, неравномерное по объему конструкций, ожидаемо должно приводить к дополнительному микротрещинообразованию преимущественно в наружных слоях конструкции);

- не учитывается влияние масштабного фактора на характеристики свойств бетона, в то время как имеющиеся результаты исследований для условий нормальной и повышенных температур [5, 14, 25] свидетельствуют о важности данного фактора;
- не учитывается влияние предистории нагрева и нагружения на характеристики механических и реологических свойств бетона (режимы нагрева и нагружения), что существенно, так как прямо связано с явлением температурного «старения» бетона [5, 9, 14, 26];
- применение в расчетах нелинейной деформационной модели рекомендовано в форме ссылки на методiku СП 63.13330.2018 и общих текстовых рекомендаций. При этом в разрешающих соотношениях в обобщенной форме не учитываются температурные деформации и деформации ползучести;
- отсутствуют рекомендации по учету работы бетона и железобетона при одноосных напряженных состояниях.

Наиболее перспективным методом расчета прочности и деформаций железобетонных конструкций при температурных воздействиях является метод расчета по нелинейной деформационной модели, в которой возможно учесть основные специфические свойства железобетона: неоднородность свойств бетона и арматуры, обусловленные неравномерным нагревом и трещинообразованием в бетоне, физическую нелинейность деформирования, усадку, ползучесть бетона, работу железобетона в условиях одноосных напряженных состояний и др.

Наиболее полное развитие деформационные модели для железобетона применительно к температурным задачам, в том числе для плоско- и объемно-напряженных элементов, получили в исследованиях [2, 4, 5, 14, 15]. Разработанные в [5, 14] аналитические выражения позволяют учитывать изменчивость характеристик свойств бетона для любого произвольного момента времени воздействия температур.

Однако указанные модели нуждаются в дальнейшем развитии применительно к современным

высокопрочным бетонам в части более полного учета основных значимых факторов влияния.

Задачи развития общей деформационной модели железобетона

Развитие методов расчета железобетонных конструкций, ориентированных на применение ЭВМ и строящихся на использовании диаграмм деформирования материалов в общем случае объемного напряженного состояния, осуществляется путем последовательного решения трех групп взаимосвязанных задач:

1. Разработка аналитических выражений, описывающих изменение основных прочностных и деформационных свойств бетона при одноосных напряженных состояниях в зависимости от ряда значимых факторов - температуры и продолжительности нагрева, уровня предварительного нагружения, скорости приложения нагрузки, возраста бетона к моменту нагрева, масштабного фактора и других.
2. Разработка модели деформирования бетона для общего случая объемного напряженного состояния, учитывающей анизотропию кратковременного и длительного деформирования бетона, обусловленную процессом разрушения структуры, и использующей в качестве исходных характеристики свойств бетона при одноосных напряженных состояниях.
3. Разработка физических соотношений для элементов железобетонных сооружений в виде пластин или брусев с учетом неоднородности свойств и граничных условий, соответствующих действиям температурно-влажностных градиентов; реализация физических соотношений в программах расчета.

Нелинейная расчетная деформационная модель железобетона строится в общем виде на основе совместного решения трех групп взаимосвязанных уравнений:

- физических, связывающих напряжения и деформации в бетоне и в арматуре;
- геометрических, устанавливающих связи между деформациями (удлинениями и кривизнами) всего железобетонного элемента и его частей в предположении справедливости закона плоских сечений;
- уравнений статического равновесия сил в расчетных сечениях.

Физические уравнения должны учитывать все составляющие полных деформаций бетона и арматуры – силовых, обусловленными действующими напряжениями, температурных, усадочных и деформаций ползучести. Силовые деформации определяются в соответствии с принятыми физическими законами деформирования бетона и арматуры с учетом всех значимых факторов влияния на параметры диаграмм деформирования.

Характеристики прочностных и деформационных свойств в условиях нагрева. Наиболее полно исследованы применительно к бетонам средней прочности. В работах [5, 8, 14, 17, 25, 26] предложены аналитические выражения для учета влияния повышенных температур на основные характеристики механических свойств обычных бетонов средней прочности. При этом структура аналитических выражений построена таким образом, что при вычислении характеристик прочности бетона при осевом сжатии $R_{b,tem}$, осевом растяжении R_{bt} и начального модуля упругости $E_{b,tem}$ условия работы бетона, характеризующиеся температурой t^0 , продолжительностью нагрева T , уровнем предварительного нагружения $\eta = \sigma_1 / R_b$, возрастом бетона к моменту нагрева τ , масштабным и другими факторами, учитываются функциями $\gamma_{b,i}, \gamma_{t,i}, \beta_{b,i}$ ($i=t^0, T, \eta, \tau, m_0$):

$$R_{b,tem}(t^0, T, \eta, \tau, m_0) = R_b \cdot \gamma_{bt} \cdot \gamma_{b,\tau} \cdot \gamma_{bm}; \quad (1)$$

$$R_{bt}(t^0, T, \eta, \tau, m_0) = R_{bt} \cdot \gamma_{tt} \cdot \gamma_{t,\eta} \cdot \gamma_{t,\tau} \cdot \gamma_{tm}; \quad (2)$$

$$E_{b,tem}(t^0, T, \eta, \tau, m_0) = E_b \cdot \beta_b \cdot \beta_\eta \cdot \beta_m. \quad (3)$$

Для стандартных испытаний предварительно ненагруженного бетона ($\eta = 0$) при $t_0^0 = +20^\circ\text{C}$ в возрасте $\tau_0 = 28$ сут значения функций $\gamma_{b,i}, \gamma_{t,i}, \beta_{b,i}$ автоматически приравниваются единице.

Предельные деформации бетона при осевом сжатии $\varepsilon_{u,tem}$ и осевом растяжении ε_{ut} в условиях нагрева с достаточной точностью могут определяться в зависимости от соответствующих характеристик ε_u и ε_{ut} в условиях нормальной температуры из следующих соотношений:

$$\varepsilon_{u,tem} = \varepsilon_u \cdot \frac{\gamma_{bt} \cdot \gamma_{b,\eta} \cdot \gamma_{b,\tau} \cdot \gamma_{b,m}}{\beta_b \cdot \beta_{b,\eta} \cdot \beta_\tau \cdot \beta_{b,m}}; \quad (4)$$

$$\varepsilon_{ut,t} = \varepsilon_{ut} \cdot \frac{\gamma_{tt} \cdot \gamma_{t,\eta} \cdot \gamma_{t,\tau} \cdot \gamma_{tm}}{\beta_b \cdot \beta_{b,\eta} \cdot \beta_\tau \cdot \beta_{b,m}}.$$

Отмечается, что выражения (4) только приближенно соответствуют опытным данным, поскольку зависят от многих факторов влияния. Входящие в них функции $\gamma_{b,i}, \gamma_{t,i}, \beta_{b,i}$ ($i=t^0, T, \eta, \tau, m_0$)

нуждаются в уточнении, особенно для случая осевого растяжения. Формальное применение соотношений (1)–(3) приводит к недооценке прочности высокопрочных бетонов на величины до 20 % как при кратковременном, так и при длительном нагреве.

Для описания диаграмм деформирования высокопрочных бетонов наиболее удачной представляется зависимость в форме, применяемой в EN 1992-1-2:2004 [24], позволяющая трансформации в соответствии с обозначенными факторами влияния. Для арматуры вполне приемлема билинейная диаграмма Прандтля.

Расчет температурно-усадочных деформаций бетона. Для условий повышенных температур применительно к обычному тяжелому бетону средних классов прочности наиболее разработанной является методика А. П. Кричевского [14], в которой полные температурные деформации бетона определяются суммой составляющих:

$$\varepsilon_{bt}(t^0, T) = (\alpha_{tt}(t^0) + \Delta\alpha_{tt}(t^0, T)) \cdot \Delta t^0 - \varepsilon_{cs}(t^0, T) = \alpha_{bt}(t^0, T) \cdot \Delta t^0. \quad (5)$$

$$\Delta t^0 = t^0 - t_0. \quad (6)$$

Методика позволяет с достаточной степенью точности для диапазона повышенных до 200°C температур и для произвольного момента времени T от начала нагрева рассчитывать деформации температурного удлинения и усадки бетона.

Применительно к высокопрочным модифицированным бетонам классов до В90 в работе [8] предложены уточненные аналитические выражения для функций $\alpha_{tt}, \Delta\alpha_{tt}, \varepsilon_{cs}$. При этом составляющей необратимых температурных деформаций, развивающихся при первом нагреве, оказалось возможным пренебречь ввиду ее малости. Это связано, очевидно, с гораздо более низким водоцементным отношением в модифицированных бетонах, приготовленных с применением суперпластификаторов.

Расчет деформаций ползучести в условиях повышенных температур. Наиболее полно методика расчета разработана в работе А. П. Кричевского [14] применительно к бетонам средней прочности. Использован математический аппарат теории старения. Температурное старение бетона учитывается трансформированием диаграмм деформирования с помощью функций

приведенного времени. Учитываются нелинейность ползучести от уровня длительного нагружения и влияние масштабного фактора с помощью параметра m_0 – модуля открытой поверхности. Предложен способ учета в аналитических соотношениях ступенчатых режимов температурных воздействий.

В работе [26] предложен вариант аналитических выражений для расчета деформаций ползучести в условиях осевого сжатия применительно к высокопрочным бетонам классов до В90, построенный на основе методики [14]. Соотношениями [26] учитывается влияние основных значимых факторов: возраста бетона к моментам нагружения и нагрева, температуры нагрева, температурного старения бетона, нелинейности ползучести, масштабного фактора. По мере накопления опытных данных соотношения [26] могут быть уточнены. При этом необходимо иметь в виду, что большинство из известных теорий ползучести бетона, построенных на основе программ «жестких» нагружений и представленных в традиционном виде их определяющих соотношений, затруднительно использовать в алгоритмах современных конечно-элементных расчетов.

Методика диаграмм-изохрон. Позволяет описывать процесс длительного деформирования бетона [2, 3, 9, 15] путем трансформации диаграмм деформирования соответственно скорости (продолжительности) возрастающего нагружения (рис. 1). Нуждается в дальнейшем развитии на основе данных экспериментальных исследований по специальным программам «мяг-

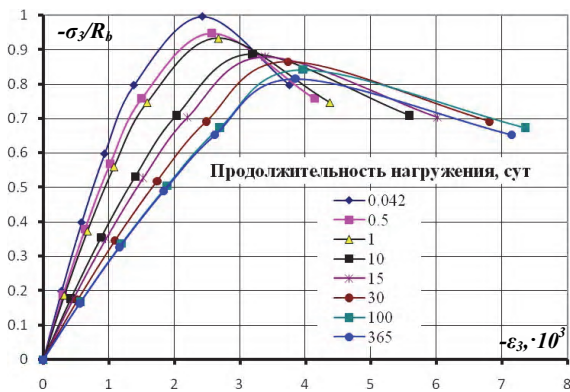


Рисунок 1. Расчетные диаграммы-изохроны для бетона для условий нормальной температуры [9].

кого» и «жесткого» нагружения. Для условий нормальной температуры построение диаграмм-изохрон выполнено в работах [2, 3, 9], для условий повышенных температур – в исследованиях [9, 15]. Методика изохрон, как методика трансформируемых диаграмм физически нелинейного деформирования бетона, является наиболее удобной для применения в алгоритмах современных вычислительных комплексов. Она нуждается в дальнейшем развитии применительно к высокопрочным бетонам для условий воздействия повышенных температур.

Ортотропная модель деформирования бетона. Необходимость ее построения обусловлена тем, что бетон в конструкциях железобетонных инженерных сооружений, эксплуатирующихся в условиях силовых и температурно-влажностных воздействий, испытывает, как правило, сложные (неодноосные) напряженные состояния, определяющие в значительной степени закономерности его деформирования и разрушения.

К настоящему времени не существует законченной расчетной модели бетона для общего случая объемного напряженного состояния. Это объясняется сложностью процесса деформирования бетона при нагружении, сопровождающегося процессами микроразрушений в его структуре, развивающимися по законам, отличным от законов деформирования сплошных тел. Проявляющаяся при этом силовая (деформационная) анизотропия имеет форму ортотропии и сопровождается явлениями сжимаемости и дилатации, имеющими определенную направленность в трехмерном пространстве напряжений.

Ортотропная модель деформирования бетона для общего случая объемного напряженного состояния, разработанная Н. И. Карпенко [2], является наиболее разработанной, однако содержит большое количество числовых коэффициентов, физический смысл которых не всегда ясен, и это является одним из сдерживающих факторов для ее дальнейшего уточнения и развития, в том числе применительно к бетонам различной прочности.

Наиболее перспективной для дальнейшего развития представляется модель [4, 5], построенная в развитие деформационной теории пластичности Г. А. Гениева [1] на основе условного разделения тензора полных деформаций на

упруго-пластические и псевдопластические составляющие. Развитие модели произведено в части:

- а) введения зависимости обобщенной диаграммы упруго-пластического деформирования бетона от вида напряженного состояния;
- б) разделения псевдопластических деформаций, связанных с микроразрушениями в структуре, на деформации сдвигового уплотнения и сдвигового разуплотнения;
- в) учета направленного, соответственно виду напряженного состояния, развития псевдопластических деформаций уплотнения и разуплотнения.

Компоненты полных деформаций в направлении осей ортотропии при кратковременном нагружении напряжениями ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$) определяются соотношениями:

$$\varepsilon_i = \frac{\sigma_i}{E} - \frac{\mu_0}{E} \cdot (\sigma_j + \sigma_k) + b_i \cdot \Theta_{pc} + a_i \cdot \Theta_d; \quad (7)$$

$(i, j, k = 1, 2, 3);$

$$b_1 + b_2 + b_3 = 1; a_1 + a_2 + a_3 = 1. \quad (8)$$

В формулах (7)–(8):

Θ_{pc} – объемная деформация уплотнения, обусловленная деформациями сдвига;

Θ_d – объемная деформация дилатации;

$b_i, a_i (i = 1, 2, 3)$ – коэффициенты разложения объемных деформаций Θ_{pc} и Θ_d на составляющие вдоль главных осей, с помощью которых учитывается направленность развития эффектов сжимаемости и дилатации.

Значения коэффициентов ортотропии $b_i, a_i (i = 1, 2, 3)$ определены из разработанной расчетной модели разрушения структуры бетона в предположении, что развитие микроразрушений происходит по сдвиго-отрывному механизму с образованием «зигзаг-трещин» и увеличение объема бетона при сжатии обусловлено образованием трещин нормального отрыва. При этом аналитические выражения для модуля деформаций E , объемных деформаций Θ_{pc} и Θ_d подбираются из условия лучшей аппроксимации опытных данных.

Применение двухинвариантной функции вида напряженного состояния для описания закономерностей изменения модуля деформаций E позволяет получить сравнительно несложный математический аппарат для всех случаев плоского напряженного состояния. Для общего случая объемного напряженного состояния функция вида напряженного состояния нуждается в

уточнении на основе результатов экспериментальных исследований по специальным программам сложного нагружения.

Модель длительного деформирования бетона при неортоанальных напряженных состояниях.

К настоящему времени не имеет законченного решения вследствие недостаточного объема достоверных данных из-за высокой сложности экспериментальных исследований процессов длительного ортотропного деформирования бетона при большом количестве вариантов действий сжимающих и растягивающих напряжений.

В исследованиях [5, 10, 12] на основе анализа опытных данных [5, 6, 7, 12, 16, 18] построена методика расчета деформаций ползучести тяжелого бетона для всех случаев плоского напряженного состояния в форме соотношений деформационной теории пластичности и представляется в виде связей между компонентами шаровых тензоров и тензоров-девиаторов напряжений и деформаций:

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma_0}{K_\sigma} = \frac{\sigma_0 \cdot (1 - 2 \cdot \mu) \cdot (1 + \varphi_v)}{E}; \quad (9)$$

$$\varepsilon_k - \varepsilon_0 = (\sigma_k - \sigma_0) \cdot \frac{(1 + \varphi_\gamma)}{2 \cdot G} = (\sigma_k - \sigma_0) \times \frac{(1 + \mu) \cdot (1 + \varphi_\gamma)}{E}; \quad (10)$$

$$(k = 1, 2, 3),$$

где σ_0, ε_0 – соответственно среднее напряжение и средняя деформация;

E, μ – соответственно начальный модуль упругости и коэффициент поперечной деформации бетона;

$\varphi_v, \varphi_\gamma$ – характеристики объемной и сдвиговой ползучести бетона, выражаемые через меры соответственно объемной C_v и сдвиговой C_γ ползучести:

$$\varphi_v = \frac{\theta_c}{\theta_{el}} = \frac{C_v \cdot E}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \mu)}; \quad (11)$$

$$\varphi_\gamma = \frac{\gamma_{i,c}}{\gamma_{i,el}} = \frac{C_\gamma \cdot E}{2 \cdot (1 + \mu)},$$

где C_v и C_γ – меры соответственно объемной и сдвиговой ползучести бетона, определяемые на основе их базовых характеристик при одноосном сжатии C_0 с учетом их зависимости от вида плоского напряженного состояния и уровня нагружения $\eta = \tau_i / \bar{\tau}_i$.

$$C_v = \frac{\theta_c}{\sigma_0} = C_0 \cdot 3 \cdot (1 - 2 \cdot \mu) \cdot A(t_0) \times \\ \times f_0(\sigma_0, \tau_i) \cdot f_1(\eta, t, t_0) \quad ; \quad (12)$$

$$C_\gamma = \frac{\gamma_{i,c}}{\tau_i} = \frac{C_0 \cdot 3 \cdot \sqrt{2}}{2} \cdot (1 + \mu) \cdot A(t_0) \times \\ \times f_0(\sigma_0, \tau_i) \cdot f_2(\eta, t, t_0) \quad (13)$$

Соотношения (9)–(13) достаточно хорошо описывают для всех случаев плоского напряженного состояния деформации ползучести бетона в направлении большего сжимающего напряжения и дают более значимые отклонения от опытных данных в менее нагруженных направлениях, что связано с учетом в данной модели анизотропии деформирования. Приведенные соотношения могут служить основой для построения более общей модели длительного ортотропного деформирования бетона для общего случая объемного напряженного состояния.

Заключение

1. Достоверная оценка расчетными методами НДС железобетонных конструкций в условиях температурных воздействий может быть получена на основе нелинейной деформационной модели, которая еще нуждается в развитии в части более полного учета длительных деформаций бетона и железобетона и их работы в условиях неодноосных напряженных состояний.

2. Построение надежных моделей деформирования бетона применительно к условиям совместных силовых и температурных воздействий возможно на основе достоверных данных экспериментальных исследований характеристик механических и реологических свойств как обычных, так и современных высокопрочных бетонов, при учете закономерностей их физически нелинейного деформирования соответственно условиям эксплуатации и видам напряженного состояния.
3. Ортотропная модель [4, 5] кратковременного деформирования бетона, построенная на основе условного разделения тензора полных деформаций на упруго-пластические и псевдопластические составляющие, представляется наиболее предпочтительной для дальнейшего развития как отражающая основные закономерности неодноосного деформирования бетона, включая силовую анизотропию псевдопластические составляющие.
4. Развитие моделей кратковременного и длительного деформирования бетона применительно к условиям неодноосных напряженных состояний требует проведения экспериментальных исследований по специальным программам пропорциональных и непропорциональных нагружений при важных для теоретических построений видах напряженных состояний.

Литература

1. Гениев, Г. А. Теория пластичности бетона и железобетона / Г. А. Гениев, В. Н. Киссюк, Г. А. Тюпин. – Москва : Стройиздат, 1974. – 316 с. – Текст : непосредственный.
2. Карпенко, Н. И. Общие модели механики железобетона / Н. И. Карпенко. – Москва : Стройиздат, 1996. – 416 с. – ISBN 5-274-01682-0. – Текст : непосредственный.
3. Учет деформаций ползучести и длительного сопротивления бетона в методике диаграмм-изохрон / Н. И. Карпенко, И. Е. Прокопович, Т. А. Мухамедиев [и др.]. – Текст : непосредственный // Совершенствование методов расчета статически неопределимых железобетонных конструкций. – Москва : НИИЖБ, 1987. – С. 66–81.
4. Корсун, В. И. К учету направленного развития микроразрушений в ортотропной модели бетона /

Reference

1. Geniyev, G. A.; Kissyuk, V. N.; Tyupin, G. A. The theory of plasticity of concrete and reinforced concrete. – Moscow : Stroiizdat, 1974. – 316 p. – Text : direct. (in Russian)
2. Karpenko, N. I. General models of reinforced concrete mechanics. – Moscow : Stroiizdat, 1996. – 416 p. – ISBN 5-274-01682-0. – Text : direct. (in Russian)
3. Karpenko, N. I.; Prokopovich, I. Ye.; Mukhamediyev, T. A. [et. al.]. Consideration of creep deformations and long-term resistance of concrete in the method of isochron diagrams. – Text : direct. – In: *Improvement of methods for calculating statically indeterminate reinforced concrete structures*. – Moscow : CRCRI, 1987. – P. 66–81. (in Russian)
4. Korsun, V. I. Taking into account the directional development of microfractures in an orthotropic concrete

- В. И. Корсун. – Текст : непосредственный // Міжвідомчий науково-технічний збірник «Будівельні конструкції». – Київ : НДІБК, 1999. – Випуск 50. – С. 119–124.
5. Корсун, В. И. Напряженно-деформированное состояние железобетонных конструкций в условиях температурных воздействий / В. И. Корсун. – Макеевка : ДонГАСА, 2003. – 153 с. – ISBN 966-7477-38-X. – Текст : непосредственный.
 6. Кириллов, А. П. Ползучесть бетона в условиях двухосного сжатия / А. П. Кириллов, В. Н. Завялов. – Текст : непосредственный // Бетон и железобетон. – 1990. – № 11. – С. 13–14.
 7. Особенности нелинейного деформирования бетона при высоких уровнях напряжения сжатия в условиях сложного напряженного состояния / А. П. Кириллов, А. Л. Кукуш, Э. Я. Багрий, В. Н. Завялов. – Текст : непосредственный // Бетон и железобетон. – 1992. – № 8. – С. 4–6.
 8. Корсун, В. И. Расчет температурно-усадочных деформаций высокопрочных бетонов применительно к условиям воздействия повышенных температур / В. И. Корсун, А. О. Баранов. – Текст : непосредственный // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2019 году : сборник научных трудов РААСН. – Москва : Издательство АСВ, 2020. – С. 190–198.
 9. Корсун, В. И. Влияние скорости нагружения на прочность и деформации бетона при осевом сжатии в условиях воздействия повышенных температур / В. И. Корсун, Е. А. Дмитренко. – Текст : непосредственный // Коммунальное хозяйство городов. – 2008. – Выпуск 81. – С. 57–67.
 10. Корсун, В. И. Закономерности изменения инвариантных характеристик ползучести бетона при неодносных напряженных состояниях / В. И. Корсун, А. В. Корсун, Р. А. Канищев. – Текст : непосредственный // Долговечность, прочность и механика разрушения строительных материалов и конструкций : материалы XI Академических чтений РААСН – Международной научно-технической конференции, 27–28 ноября 2020 г. – Саранск : Изд-во Мордовского ун-та, 2020. – С. 74–82.
 11. Корсун, В. И. Влияние повышенных до 200 °С температур на характеристики физико-механических свойств высокопрочного сталефибробетона / В. И. Корсун, С. Н. Машталер. – Текст : непосредственный // Фундаментальные поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2017 году : сборник научных трудов РААСН. В 2 томах. Т. 2. – Москва : Издательство АСВ, 2018. – С. 265–274.
 12. Корсун, В. И. Исследование ползучести бетона при плоском напряженном состоянии / В. И. Корсун, А. Н. Машченко. – Текст : непосредственный // Вісник ДонДАБА. – 2001. – Випуск 2001-4(29). – С. 65–72.
 - model. – Text : direct. – In: *Interdepartmental scientific and technical collection «Building structures»*. – Kiev : SRIBS, 1999. – Issue 50. – P. 119–124. (in Russian)
 5. Korsun, V. I. Stress-strain state of reinforced concrete structures under temperature conditions. – Makeevka : DACEA, 2003. – 153 p. – ISBN 966-7477-38-X. – Text : direct. (in Russian)
 6. Kirillov, A. P.; Zavyalov, V. N. Creep of concrete under biaxial compression. – Text : direct. – In: *Concrete and reinforced concrete*. – 1990. – № 11. – P. 13–14. (in Russian)
 7. Kirillov, A. P.; Kukush, A. L.; Bagry, E. Ya.; Zavyalov, V. N. Features of nonlinear deformation of concrete at high levels of compressive stress in a complex stress state. – Text : direct. – In: *Concrete and reinforced concrete*. – 1992. – № 8. – P. 4–6. (in Russian)
 8. Korsun, V. I.; Baranov, A. O. Calculation of temperature-shrinkage deformations of high-strength concretes in relation to the conditions of exposure to elevated temperatures. – Text : direct. – In: *Fundamental, exploratory and applied research of the RAABS on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2019: collection of scientific papers RAABS*. – Moscow : Publisher ACB, 2020. – P. 190–198. (in Russian)
 9. Korsun, V. I.; Dmitrenko, Ye. A. Influence of the loading rate on the strength and deformation of concrete under axial compression under conditions of exposure to elevated temperatures. – Text : direct. – In: *Utilities of cities*. – 2008. – Issue 81. – P. 57–67. (in Russian)
 10. Korsun, V. I.; Korsun, A. V.; Kanishchev, R. A. Regularities of the change in the invariant characteristics of concrete creep under uniaxial stress states. – Text : direct. – In: *Durability, strength and mechanics of destruction of building materials and structures: materials of the XI Academic Readings of the RAABS – International Scientific and Technical Conference*. – Saransk : Publishing House of Mordovian University, 2020. – P. 74–82. (in Russian)
 11. Korsun, V. I.; Mashtaler, S. N. Influence of temperatures elevated to 200 °C on the characteristics of the physical and mechanical properties of high-strength steel fiber reinforced concrete. – Text : direct. – In: *Fundamental, exploratory and applied research of the RAABS on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2017: collection of scientific papers RAABS*. In 2 volume. Vol. 2. – Moscow : Publisher ACB. P. 265–275. (in Russian)
 12. Korsun, V. I.; Mashchenko, A. N. Study of the creep of concrete in a plane stress state. – Text : direct. – In: *Bulletin of the DACEA*. – 2001. – Issue 2001-4(29). – P. 65–72. (in Russian)
 13. Korsun, V. I.; Nedorezov, A. V. Peculiarities of deformation of heavy concrete of different strength under complex loading conditions under conditions of uniaxial and triaxial compression. – Text : direct. – In: *Fundamental, exploratory and applied research of the RAABS on scientific support for the development*

13. Корсун, В. И. Особенности деформирования тяжелых бетонов различной прочности при сложных режимах нагружения в условиях одно- и трехосного сжатия / В. И. Корсун, А. В. Недорезов. – Текст : непосредственный // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2018 году : сборник научных трудов РААСН. В 2 томах. Т. 2. – Москва : Издательство АСВ, 2019. – С. 291–302. – ISBN978-5-4323-0313-4.
14. Кричевский, А. П. Расчет железобетонных инженерных сооружений на температурные воздействия / А. П. Кричевский. – Москва : Стройиздат, 1984. – 148 с. – Текст : непосредственный.
15. Кричевский, А. П. Расчет инженерных сооружений на температурные воздействия с использованием изохрон / А. П. Кричевский, В. И. Корсун, А. М. Баев. – Текст : непосредственный // Проектирование и строительство инженерных сооружений из монолитного железобетона : сборник трудов. – Ленинград : [б. и.], 1989. – С. 73–86.
16. Малашкин, Ю. Н. Ползучесть бетона при напряженном состоянии сжатие-растяжение / Ю. Н. Малашкин, Н. В. Прядко. – Текст : непосредственный // Бетон и железобетон. – 1979. – № 3. – С. 26–27.
17. Некрасов, К. Д. Тяжелый бетон в условиях повышенных температур / К. Д. Некрасов, В. В. Жуков, В. Ф. Гуляева. – Москва : Стройиздат, 1972. – 128 с. – Текст : непосредственный.
18. Прядко, Н. В. Ползучесть бетона при двухосном сжатии / Н. В. Прядко, Ю. Н. Малашкин. – Текст : непосредственный // Бетон и железобетон. – 1980. – № 5. – С. 40–41.
19. СП 27.13330.2017. Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур = Concrete and reinforced concrete structures intended for the service in elevated and high temperatures : издание официальное : утверждено и введено в действие Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 15 мая 2017 г. N 786/пр : актуализированная редакция СНиП 2.03.04-84 : дата введения 2017-11-06 / подготовлен Департаментом градостроительной деятельности и архитектуры Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России). – Москва : Стандартинформ, 2017. – 106 с. – Текст : непосредственный.
20. СП 21-00-00. Огнестойкость и огнесохранность железобетонных конструкций = Concrete and reinforced concrete structures. Rules for ensuring of fire resistance and fire safety : издание официальное : утверждено приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 10 декабря 2019 г. *of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2018 : collection of scientific papers RAABS*. In 2 volume. Vol. 2. – Moscow : Publisher ACB, 2019. – P. 291–302. – ISBN978-5-4323-0313-4. (in Russian)
21. Krichevsky, A. P. Calculation of reinforced concrete engineering structures for temperature effects. – Moscow : Stroiiizdat, 1984. – 148 p. – Text : direct. (in Russian)
22. Krichevsky, A. P.; Korsun, V. I.; Bayev, A. M. Calculation of engineering structures for temperature effects using isochrones. – Text : direct. – In: *Design and construction of engineering structures from monolithic reinforced concrete: proceedings*. – Leningrad : [s. n.], 1989. – P. 73–86. (in Russian)
23. Malashkin, Yu. N.; Pryadko, N. V. Creep of concrete under stress compression-tension. – Text : direct. – In: *Concrete and reinforced concrete*. – 1979. – № 3. – P. 26–27. (in Russian)
24. Nekrasov, K. D.; Zhukov, V. V.; Gulyayeva, V. F. Heavy concrete at elevated temperatures. – Moscow : Stroiiizdat, 1972. – 128 p. – Text : direct. (in Russian)
25. Pryadko, N. V.; Malashkin, Yu. N. Creep of concrete under biaxial compression. – Text : direct. – In: *Concrete and reinforced concrete*. – 1980. – № 5. – P. 40–41. (in Russian)
26. SP 27.13330.2017. Concrete and reinforced concrete structures intended for the service in elevated and high temperatures. – Moscow : Standardinform, 2017. – 106 p. – Text : direct. (in Russian)
27. SP 21-00-00. Concrete and reinforced concrete structures. Rules for ensuring of fire resistance and fire safety. – Moscow : Standardinform, 2020. – 86 p. – Text : direct. (in Russian)
28. STO 36554501-006-2006. Rules for ensuring fire resistance and fire safety of reinforced concrete structures made of heavy concrete. – Moscow : FSUE RC «Building», 2006. – 83 p. – Text : direct. (in Russian)
29. Milovanov, A. F.; Solomonov, V. V.; Kuznetsova, I. S. [et. al.]. Manual for calculating fire resistance and fire safety of reinforced concrete structures made of heavy concrete (to STO 36554501-006-2006). – Moscow : A. A. Gvozdeva CRCRI, 2008. – 213 p. – Text : direct. (in Russian)
30. DSTU-N B EN 1992-1-2:2012 Eurocode 2. Design of reinforced concrete structures. Part 1-2. General Provisions. Fire analysis of structures (EN 1992-1-2:2004, IDT). – Kiev : Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine, 2013. – 135 p. – Text : direct. (in Ukrainian)
31. EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design. – Brussels : CEN, 2004. – 99 p. – Text : direct. (in English)
32. Khon, Khemarak; Korsun, Vladimir; Ha, Quynh; Volkov, Andrey. Effect of Short-Term Heating up to +90 °C on Deformation and Strength of High-Strength Concrete. – Text : direct. – In: *International*

- № 790/пр : введен впервые : дата введения 2020-06-11 / подготовлен Департаментом градостроительной деятельности и архитектуры Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России). – Москва : Стандартинформ, 2020. – 86 с. – Текст : непосредственный.
21. СТО 36554501-006-2006 Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций из тяжелого бетона : издание официальное : утвержден Приказом и. о. генерального директора ФГУП «НИЦ Строительство» от 20 октября 2006 г. № 156 : на замену «МДС 21-2.2000 «Методические рекомендации по расчету огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций» ; «Пособия по определению пределов огнестойкости конструкций, пределов распространения огня и групп возгораемости материалов» в части железобетонных конструкций ; «Рекомендаций по защите бетонных и железобетонных конструкций от хрупкого разрушения при пожаре» [и др.] : введен в действие 2006-10-20 / разработан и внесен лабораторией температуростойкости и диагностики бетона и железобетонных конструкций НИИЖБ. – Москва : ФГУП НИЦ «Строительство», 2006. – 83 с. – Текст : непосредственный.
22. Пособие по расчету огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций из тяжелого бетона (к СТО 36554501-006-2006) : издание официальное : утверждено НИИЖБ им. А. А. Гвоздева : введено впервые : дата введения 2008-01-01 / разработано А. Ф. Миловановым, В. В. Соломонова, И. С. Кузнецовой [и др.]. – Москва : НИИЖБ им. А. А. Гвоздева, 2008. – 213 с. – Текст : непосредственный.
23. ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012 Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1992-1-2:2004, IDT) : видання офіційне : затверджено Наказом Державного науково-дослідного інституту будівельних конструкцій від 21 грудня 2012 р. № 652 : введено вперше : надано чинності 2013-07-01 / Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій». – Київ : Мінрегіон України, 2013. – 135 с. – Текст : непосредственный.
24. EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design. – Supersedes ENV 1992-1-2:1995; This European Standard was approved by CEN on December 2004. – Brussels : CEN, 2004. – 99 p. – Текст : непосредственный.
25. Effect of Short-Term Heating up to +90 °C on Deformation and Strength of High-Strength Concrete / Khemarak Khon, Vladimir Korsun, Quynh Ha, Andrey Volkov. – Текст : непосредственный // International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction
- Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE 2019)*. – St. Petersburg : Peter the Great St. Petersburg Politechnik University, 2019. – P. 585–590. (in English)
26. Korsun, V. The calculation of creep deformation of high-strength concrete in relation to the conditions of exposure to elevated temperatures / V. Korsun, G. Shvets. – DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012039. – Text : electronic. – In: *IOP Conference Series: materials Science and Engineering*. – 2020. – 896 (2020) 012039. – P. 1–8. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/896/1/012039/pdf> (date of the application: 12.02.20201). (in English)

Engineering (EECE 2019), 19–20 November 2019. – St. Petersburg : Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2019. – P. 585–590.

26. Korsun, V. The calculation of creep deformation of high-strength concrete in relation to the conditions of exposure to elevated temperatures / V. Korsun, G. Shvets. – DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012039. – Текст : электронный // IOP Conference Series : materials Science and Engineering, April 27–28, 2020, Vladimir. – 2020. – 896 (2020) 012039. – P. 1–8. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/896/1/012039/pdf> (дата обращения: 12.02.2020).

Корсун Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры строительства уникальных зданий и сооружений, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого». Научные интересы: разработка методов расчета железобетонных конструкций для общего случая объемного напряженного состояния с учетом силовых и температурно-влажностных воздействий различной длительности.

Корсун Володимир Іванович – доктор технічних наук, професор кафедри будівництва унікальних будівель і споруд, ФДАОУ ВПО «Санкт-Петербурзький політехнічний університет Петра Великого». Наукові інтереси: розробка методів розрахунку залізобетонних конструкцій для загального випадку об'ємного напруженого стану з урахуванням силових та температурно-вологісних впливів різної тривалості.

Korsun Volodymyr – Dr. Sc., Professor Construction of Unique Buildings and Structures Department, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Scientific interests: development of methods for calculating reinforced concrete structures for the general case of a volumetric stress state, taking into account power and temperature-humidity effects of various durations.