

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА И МЕТОДОВ ВОЗВЕДЕНИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. СОВРЕМЕННЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ И МАТЕРИАЛЫ

УДК 624.012.45

МОДЕЛЬ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

В. С. Федоров, В. Е. Левитский

Московский государственный университет путей сообщения (Россия)

Для описания термомеханического состояния бетона при сжатии предлагается использовать всего семь параметров, назначив их с заданной обеспеченностью, можно оценить уровень надежности результатов расчета по предлагаемой модели. Предлагаемая методика описания диаграммы термомеханического состояния дает возможность учитывать реальные условия нагрева материалов в конструкциях под нагрузкой и позволит компактно задавать температурные зависимости прочностных и деформативных характеристик бетона и арматуры, что существенно облегчает их нормирование и использование в современной автоматизированной расчетной среде.

Ключевые слова: *модель при термомеханическом состоянии, бетон, прочность, автоматизированная расчетная среда.*

To describe the thermo-mechanical state of the concrete in compression is proposed to use a total of seven options, assigning them to a given security, it is possible to assess the level of reliability of calculation results of the proposed model. The proposed method of describing diagrams thermomechanical able to take into account the actual conditions of heating materials in structures under load and allow compact set temperature dependence of the strength and deformation characteristics of concrete and rebar, which significantly facilitates the valuation and the use of modern automated the estimated environment.

Keywords: *model for thermo-mechanical condition, concrete strength, automated calculated part.*

Одним из основных направлений разработки теории силового сопротивления железобетона является создание практического метода расчета конструктивных элементов, учитывающего их действительное напряженно-деформированное состояние. Такой метод позволяет с единых методологических позиций оценить прочность и деформативность элемента на всех стадиях его работы.

В основе этого метода лежит обобщенная физико-математическая модель напряженно-деформированного состояния, в которой сечение железобетонного конструктивного элемента рассматривается в виде совокупности отдельных конечных элементов (волокон, полос, стержней). Считается, что

каждый такой отдельный элемент находится в условиях простого (то есть осевого) растяжения или сжатия.

В качестве феноменологической основы данного метода выступает диаграмма механического состояния (деформирования) материала, устанавливающая взаимосвязь между внешним воздействием и внутренними факторами, характеризующими реакцию структуры рассматриваемого материала на это воздействие.

В зависимости от вида внешнего воздействия (кратковременное, длительное, температурное, многократно повторное и т. д.) происходит трансформация диаграммы. В данной работе рассматривается трансформация диаграммы состояния бетона при кратковременном нестационарном высокотемпературном воздействии, режим которого близок условиям нагрева при пожаре.

В настоящее время существует два варианта представления формы диаграммы механического состояния.

По первому варианту, который на данный момент является традиционным для России и ряда зарубежных стран, используется кусочно-линейная диаграмма, состоящая из двух или трех линейных участков, соединяющих характерные базовые точки (рис. 1). Первый участок диаграммы 0-1 характеризует упругую работу бетона до условного предела пропорциональности. На втором участке 1-0 установлена связь между напряжениями и деформациями бетона от условного предела пропорциональности до предельного значения напряжения при однородном напряженном состоянии - при центральном сжатии (прямоугольная эпюра напряжений). Третий участок 0-2 при постоянном значении напряжений, равном сопротивлению нагретого бетона сжатию, характеризует изменение предельного значения деформаций бетона от однородного напряженного состояния до наибольшего значения при неоднородном напряженном состоянии (при треугольной эпюре деформаций) бетона. При ее построении исходят из утверждения, что на конечные результаты расчета не так влияет сама форма диаграммы, как положение ее характерных (базовых) точек.

Основная базовая точка соответствует предельным напряжениям и деформациям, получаемым из стандартных испытаний; дополнительные базовые точки являются производными основной. При расчете напряжения в основной базовой точке «О» диаграммы принимаются равными значению сопротивления бетона при центральном сжатии $R_b \gamma_{bt}$ и соответствующей предельной деформации ε_{bo} .

Соединяя базовые точки прямыми, получают диаграмму состояния. Координаты промежуточных точек диаграммы находят путем линейной интерполяции. Трансформация диаграммы осуществляется путем изменения параметров основной базовой точки и соответствующего изменения параметров других базовых точек.

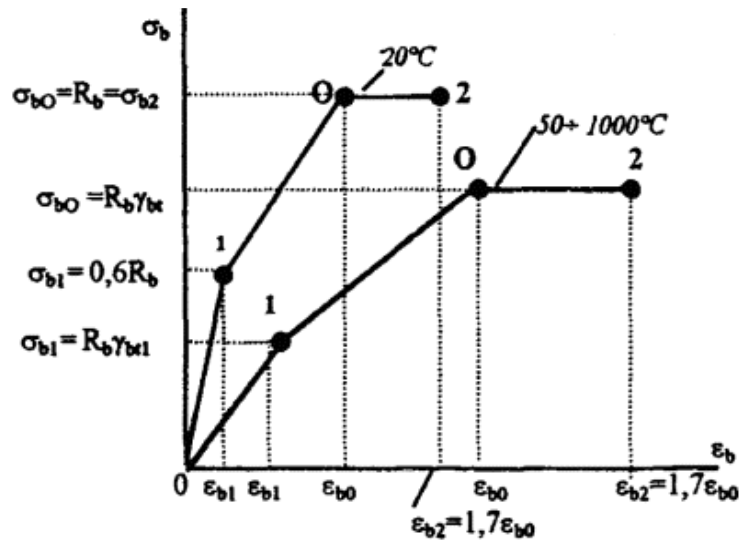


Рис. 1. Кусочно-линейная диаграмма деформирования бетона на сжатие при нагреве

При огневом воздействии сжатые элементы подвергаются неравномерному нагреву. Разрушение этих элементов происходит по более прочному, менее нагретому бетону, обладающему меньшей предельной деформацией. Поэтому предельная деформация сжатия бетона должна приниматься по наименьшей температуре нагрева бетона в поперечном сечении элемента.

Физической природе нелинейности деформирования гораздо лучше соответствует диаграмма в виде кривой, описываемой математическими выражениями (рис. 2). Есть предложения по описанию диаграмм набором аналитических зависимостей, но при этом выражения имеют громоздкий вид и не сохраняется непрерывность функций в окрестностях базовых точек. Предпочтительнее характеризовать кривую деформирования одним уравнением, которое называется уравнением механического состояния.

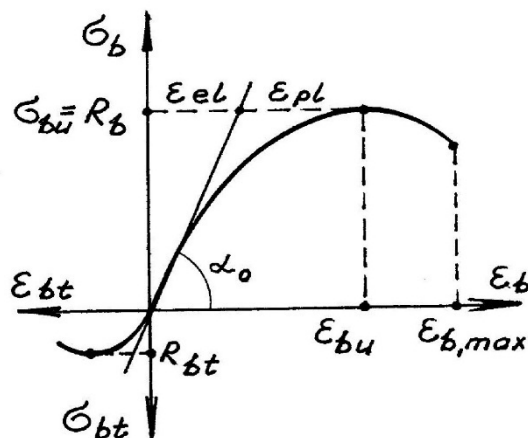


Рис. 2. Диаграмма деформирования бетона на сжатие

Трансформация нелинейных диаграмм производится в основном так же, как и линейных, то есть путем переноса основной базовой точки. При повышении температуры бетона диаграммы предлагается трансформировать, исходя из их **свойства аффинноподобия**. Оно заключается в том, что диаграммы, построенные в относительных координатах, одинаковы при любой температуре. Это дает возможность описать их единым **уравнением термомеханического состояния**.

Проведенный нами анализ большого числа экспериментальных данных исследований влияния высокотемпературного нагрева на физико-механические свойства бетона выявил две характерные особенности. Во-первых, на результаты испытаний заметно влияют условия их проведения. Во-вторых, результаты испытаний при аналогичных условиях хорошо согласуются с кинетической концепцией прочности твердых тел.

Наиболее заметное влияние на физико-механические характеристики бетона при воздействии температуры оказывает **последовательность нагрева образцов и приложения нагрузки**. Наиболее распространенными являются три схемы испытаний:

1. **Нагрев без нагрузки до исследуемой температуры и последующее нагружение до разрушения.** Эта методика аналогична испытаниям при нормальной температуре. Однако она не учитывает, что реальные конструкции нагреваются, находясь под воздействием эксплуатационной силовой нагрузки, при этом в материале интенсифицируются процессы *неустановившейся высокотемпературной ползучести*. Особенно сильно она проявляется при больших значениях температуры и малых уровнях нагружения.

2. **Нагрев до исследуемой температуры под нагрузкой некоторого уровня и последующее нагружение до разрушения.** Такая методика в некоторой мере учитывает *неравновесность деформирования материала*, однако практическая ее реализация достаточно сложна из-за необходимости проведения большого числа испытаний с разными уровнями начального нагружения.

3. **Нагрев до исследуемой температуры без нагрузки, охлаждение до нормальной температуры и последующее нагружение до разрушения.** Полученные таким образом данные лучше всего использовать для оценки остаточной прочности и деформативности конструкций после пожара. Применение их для оценки работы конструкции во время пожара возможно лишь в ограниченных пределах, а именно там, где можно пренебречь *необратимостью изменения силового сопротивления бетона* разрушению и деформированию.

4. **Нагрев элемента под нагрузкой до разрушения.** Эта методика наиболее полно учитывает реальные условия работы конструкции при пожаре, когда они нагреваются, находясь под воздействием эксплуатационной силовой нагрузки.

Проанализировав достоинства и недостатки имеющихся схем нагрева и нагружения, можно сделать вывод, что для прогноза огнестойкости железобетонных конструкций целесообразнее использовать четвертую схему.

Кроме схем нагрева и нагружения на величину параметров базовой точки диаграммы деформирования также оказывают влияние **температурные напряжения**, которые возникают в результате неравномерного нагрева массивных образцов (стандартных кубов и призм). Исключить влияние температурных напряжений позволяет разработанная во ВНИИПО методика [3], согласно которой испытания проводят на пустотелых цилиндрах, нагреваемых с обеих сторон, в результате чего достигается их равномерный прогрев.

В ходе обработки результатов испытаний образцов при нагружении после нагрева до 200...900 °С была выявлена достаточно интересная особенность термосилового сопротивления бетона: точки пересечения касательных к кривым деформирования в начале координат и вертикальных прямых, проходящих через вершины диаграмм при различных температурах нагрева, лежат практически на одной горизонтальной прямой. С позиций статистической теории прочности, полученный результат означает, что *предельные структурные напряжения в бетоне не зависят от температуры нагрева*.

Применение этой предпосылки позволяет достаточно простым путем определять начальные модули изотермических диаграмм деформирования бетона при нагреве под нагрузкой, а кроме того, отказаться от нормирования температурной зависимости коэффициента упругости бетона и характеризовать его термомеханическое состояние не тремя, а только двумя определяющими параметрами – прочностным $\gamma_{b,t}$ и деформативным $\beta_{b,t}$.

Тогда изменение прочности $\sigma_{bu,ti}$ на сжатие и начального модуля деформаций $E_{b,ti}$ при нагреве бетона (рис.2) можно выразить следующим образом:

$$\sigma_{bu,ti} = \sigma_{bu,0} \cdot \gamma_{b,ti}; \quad E_{b,ti} = E_{b,0} \cdot \beta_{b,ti}, \quad (1)$$

где $\sigma_{bu,0}$ и $E_{b,0}$ – соответственно прочность и начальный модуль деформаций бетона до нагрева.

Предельная сжимаемость $\varepsilon_{bu,ti}$ и предельный коэффициент секущего модуля деформаций бетона $\nu_{bu,ti}$ при нагреве:

$$\varepsilon_{bu,ti} = \varepsilon_{bu,0} / \beta_{b,ti}; \quad \nu_{bu,ti} = \nu_{bu,0} \cdot \gamma_{b,ti}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_{bu,0}$ и $\nu_{bu,0}$ – соответственно предельная сжимаемость и предельный коэффициент секущего модуля бетона до нагрева; $\nu_{bu,0} = \sigma_{bu,0} / (E_{b,0} \cdot \varepsilon_{bu,0})$.

Необходимые для проведения практических расчетов зависимости коэффициента секущего модуля бетона $\nu_{b,t}$ от уровня деформаций $\eta_{\varepsilon,t}$ и коэффициента снижения прочности бетона $\gamma_{b,t}$ от температуры нагрева t_b в разработанной структурно-статистической модели рассматриваются как *интегральные функции* статистических распределений прочности и температуры

разрушения структурных связей. Это определяет подход к эффективному аналитическому описанию указанных зависимостей.

Для композиционных материалов (тяжелый и легкий бетон, полимер-бетон) уравнение связи напряжений $\sigma_{b,ti}$ и деформаций $\varepsilon_{b,ti}$ бетона при нагреве можно принять в форме нелинейного закона Гука с применением секущих модулей $E_{b,ti}$ и $\nu_{b,ti}$:

$$\sigma_{b,ti} = E_{b,ti} \cdot \nu_{b,ti} \cdot \varepsilon_{b,ti}. \quad (3)$$

В качестве исходного соотношения математической модели термомеханического состояния бетона принято кинетическое уравнение нелинейного накопления повреждений в структуре материала, основанное на распределении Вейбулла:

$$\frac{dy}{dt} = -k \cdot (y - a) \cdot mt^{m-1}, \quad (4)$$

где y , a – соответственно текущее и предельное значения исследуемой характеристики; t – параметр активного воздействия (температура или уровень деформаций); k – параметр затухания процесса; m – показатель интенсивности.

Решения уравнения (4) имеют вид:

при $a = 0$ и начальном условии $t = 0$, $y = A$

$$y = Ae^{-kt^m}; \quad (5)$$

при $a \neq 0$ и начальном условии $t = 0$, $y = 0$

$$y = a \cdot \left(1 - e^{-kt^m}\right). \quad (6)$$

На основе решения (5) получены аналитические выражения, которые при минимальном количестве опытных параметров описывают температурные зависимости коэффициентов снижения прочности $\gamma_{b,ti}$ и начального модуля деформаций бетона $\beta_{b,ti}$:

$$\gamma_{b,ti} = \exp \left[-\gamma \cdot \left(\frac{t_{b,i} - t_0}{1000} \right)^m \right]; \quad \beta_{b,ti} = \exp \left[-\beta \cdot \left(\frac{t_{b,i} - t_0}{1000} \right)^n \right], \quad (7)$$

где $t_{b,i}$ – температура нагрева бетона; t_0 – начальная температура ($t_0 = 20$ °C); γ , β , m , n – опытные параметры; 1000 – размерный коэффициент.

Зависимость для температурных деформаций бетона формируется на основе решения (6):

$$\varepsilon_{b,ti}^{(tem)} = \varepsilon_\alpha \cdot \left(1 - \exp \left[-\alpha \cdot \left(\frac{t_{b,i} - t_0}{1000} \right)^p \right] \right), \quad (8)$$

где ε_α – некоторое предельное значение температурных деформаций, к которому они асимптотически приближаются; α , p – опытные параметры.

Аналитическая зависимость для коэффициента секущего модуля формируется на основе решения (5):

$$\nu_{b,ti} = \exp [-k_{b,ti} \cdot (\eta_{\varepsilon,ti})^{m_{b,ti}}], \quad (9)$$

где $\eta_{\varepsilon,ti}$ – уровень деформаций бетона, равный отношению фактических силовых деформаций $\varepsilon_{b,ti}$ к их предельной величине при данной температуре нагрева $\varepsilon_{bu,ti}$:

$$\eta_{\varepsilon,ti} = \frac{\varepsilon_{b,ti}}{\varepsilon_{bu,ti}}. \quad (10)$$

Параметр нелинейности диаграммы деформирования $k_{b,ti}$ определяется из условия, что в вершине диаграммы ($\eta_{\varepsilon,ti} = 1$) коэффициент секущего модуля бетона $v_{b,ti}$ равен своему предельному значению $v_{bu,ti}$:

$$k_{b,ti} = -\ln(v_{bu,ti}); \quad (11)$$

показатель m_i определяется из условия, что угол наклона касательной в вершине диаграммы равен нулю:

$$m_{b,ti} = \frac{1}{k_{b,ti}}. \quad (12)$$

Таким образом, зависимость для коэффициента секущего модуля принимает вид:

$$v_{b,ti} = \exp[-k_{b,ti} \cdot (\eta_{\varepsilon,ti})^{1/k_{b,ti}}]. \quad (13)$$

Если уровень деформаций бетона превышает максимально допустимое значение $\eta_{\varepsilon}^{(\max)}$, то коэффициент секущего модуля $v_{b,ti} = 0$ (разрушение).

Максимальный уровень деформаций $\eta_{\varepsilon}^{(\max)}$ устанавливается в зависимости от вида напряженного состояния: при однородном напряженном состоянии $\eta_{\varepsilon}^{(\max)} = 1,0$; при неоднородном напряженном состоянии (изгиб, внецентренное сжатие) задан условный уровень $\eta_{\varepsilon}^{(\max)} = 1,8$.

Уравнение связи напряжений $\sigma_{b,ti}$ и деформаций $\varepsilon_{b,ti}$ бетона можно записать и в функции касательных модулей $E_{b,ti} v_{b,ti}^{(ks)}$ [4]:

$$d\sigma_{b,ti} = E_{b,ti} \cdot v_{b,ti}^{(ks)} \cdot d\varepsilon_{b,ti}. \quad (14)$$

Подставляя (13) в исходное выражение (3) и дифференцируя, получим:

$$\frac{d\sigma_{b,ti}}{d\varepsilon_{b,ti}} = E_{b,ti} v_{b,ti} \cdot [1 - (\eta_{\varepsilon,ti})^{1/k_{b,ti}}], \quad (15)$$

тогда коэффициент изменения касательного модуля

$$v_{b,ti}^{(ks)} = v_{b,ti} \cdot [1 - (\eta_{\varepsilon,ti})^{1/k_{b,ti}}]. \quad (16)$$

Предлагаемая методика позволяет использовать в расчете непосредственно коэффициенты секущего или касательного модуля; описывать восходящую и нисходящую ветвь единой зависимостью; учитывать без применения каких-либо дополнительных опытных параметров изменение характера нелинейности диаграмм при их трансформации.

Для описания диаграммы термомеханического состояния бетона при сжатии (рис. 3) используется семь опытных параметров (табл. 1), а также три характеристики прочностных и деформативных свойств бетона при нор-

мальных условиях ($\sigma_{bu,0}$, $E_{b,0}$, $\epsilon_{bu,0}$). В случае растяжения температурная зависимость прочности бетона принимается такой же, как и при сжатии, а исходные характеристики $\sigma_{bu,0}$ и $\epsilon_{bu,0}$ заменяются на $\sigma_{btu,0}$ и $\epsilon_{btu,0}$.

Таблица 1

Характеристики изменения свойств бетона при нагреве

Опытные параметры		Вид бетона		
		тяжелый на гранитном заполнителе	тяжелый на известняковом заполнителе	керамзитобетон
Характеристики снижения прочности	m	4,0	6,0	4,0
	γ	2,6	6,0	2,2
Характеристики снижения начального модуля деформаций	n	0,6	1,0	1,0
	β	3,0	3,7	3,4
Характеристики температурных деформаций	p	2,5	3,0	2,0
	α	4,4	3,6	2,6
	ϵ_{α} , %	2,3	2,2	1,3

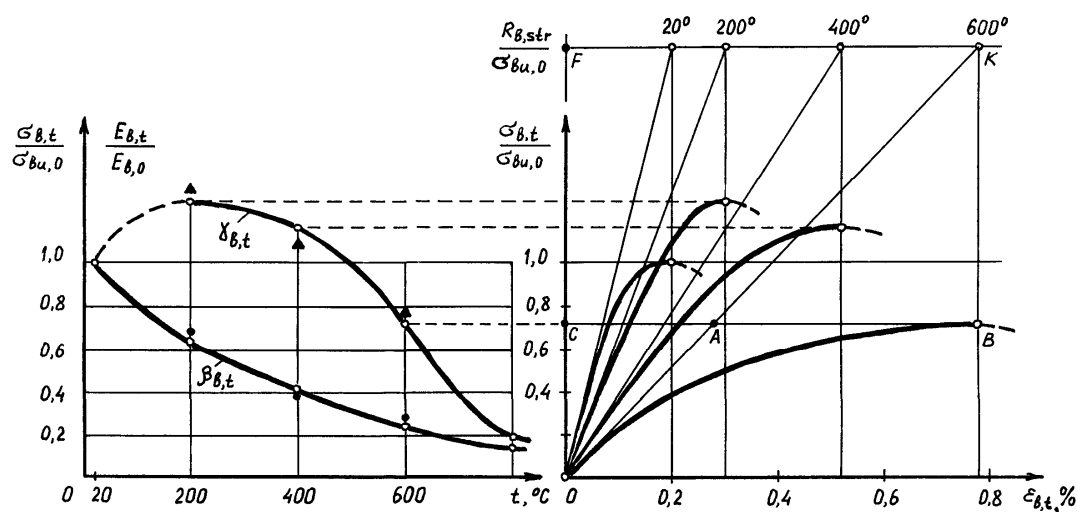


Рис. 3. Кривые снижения прочности $\gamma_{b,t}$ и модуля упругости $\beta_{b,t}$ бетона при нагреве; \blacktriangle значения $\lambda_{b,t}$; \bullet значения $\epsilon_{bu,0}/\epsilon_{bu,t}$

Рис. 4. Диаграммы деформирования бетона при различных температурах нагрева и постоянство предельных структурных напряжений $R_{b,str}$

Данная методика не учитывает влияние фактического состава и влажностного содержания бетона на изменение его прочностных и деформативных характеристик при нагреве. Перечисленные особенности являются предметом самостоятельных исследований и обязательно будут учтены в дальнейшем.

Итак, для описания термомеханического состояния бетона при сжатии предлагается использовать всего семь параметров. Назначив их с заданной обеспеченностью, можно оценить уровень надежности результатов расчета по предложенной модели.

Предлагаемая методика описания диаграммы термомеханического состояния учитывает реальные условия нагрева материалов в конструкциях под нагрузкой и позволяет компактно задавать температурные зависимости прочностных и деформативных характеристик бетона и арматуры, что существенно облегчает их нормирование и использование в современной автоматизированной расчетной среде. Применение разработанных предложений в практических расчетах будет способствовать повышению уровня конструктивной безопасности зданий и сооружений при пожаре.

Список литературы

1. Элементы теории реконструкции железобетона / В. М. Бондаренко, А. В. Боровских, С. В. Марков, В. И. Римшин ; под общ. ред. В. М. Бондаренко. Н. Новгород : Нижегород. гос. арх.-строит. университет, 2002. 190 с.
2. Мурашев В. И. Трещиностойчивость, жесткость и прочность железобетона. М. : Машстройиздат, 1950. 267 с.
3. Голышев А. Б., Бачинский В. Я. К разработке прикладной теории расчета железобетонных конструкций // Бетон и железобетон. 1985. № 6. С. 16–18.
4. Расторгуев Б. С. Упрощенная методика получения диаграмм деформирования стержневых элементов в стадии с трещинами // Бетон и железобетон. 1993. № 3. С. 16–19.
5. Боровских А. В., Назаренко В. Г. Теория силового сопротивления сжатых железобетонных конструкций. М. : Отдел информ.-изд. деятельности РААСН, 2000. 112 с.
6. Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях / Г. А. Гениев, В. И. Колчунов, Н. В. Ключева, А. И. Никулин, К. П. Пятикрестовский. М. : Изд-во АСВ, 2004. 216 с.
7. Бондаренко В. М., Колчунов Вл. И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона. М. : Изд-во АСВ, 2004. 472 с.
8. Общий случай расчета прочности элементов по нормальным сечениям / В. Н. Байков, М. И. Додонов, Б. С. Расторгуев и др. // Бетон и железобетон. 1987. № 5. С. 16–18.
9. Карпенко Н. И., Мухамедиев Т. А., Сапожников М. А. К построению методики расчета стержневых элементов на основе диаграмм деформирования материалов // Совершенствование методов расчета статически неопределимых железобетонных конструкций. М., 1987. С. 4–24.
10. Карпенко Н. И. Общие модели механики железобетона. М. : Стройиздат, 1996. 416 с.
11. Расчет прочности железобетонных конструкций при действии изгибающих моментов и продольных сил по новым нормативным документам / А. И. Звездов, А. С. Залесов, Т. А. Мухамедиев, Е. А. Чистяков // Бетон и железобетон. 2002. № 2. С. 21–25.
12. Крылов С. Б. Расчет железобетонных конструкций методом гладко-сопряженных элементов на основе точных частных решений : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / НИИЖБ. М., 2003. 43 с.