

УДК 614.841.332

МОДЕЛИ МАТЕРИАЛОВ АРМАТУРЫ И БЕТОНА ДЛЯ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ И ПРОЧНОСТНЫХ РАСЧЕТОВ НА ПРИМЕРЕ РОССИЙСКОГО СТАНДАРТА

Камлюк А.Н., к.ф.-м.н., доцент*, Полевода И.И., к.т.н., доцент*,
Ширко А.В., к.ф.-м.н.**

*Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь

**Белорусский государственный технологический университет

e-mail: mail@kii.gov.by

Разработаны параметрические модели железобетонных плит, балок и колонн. Получены нелинейные модели материалов бетона и арматурной стали, которые включают упругопластические, температурозависимые диаграммы деформирования, а также трещинообразование в бетоне. Результаты будут положены в основу программ оценки огнестойкости элементов конструкций.

The parametric models of reinforced concrete slabs, beams and columns were developed. The nonlinear material models of concrete and reinforcing steel, which include elastic-plastic, temperature-related stress-strain relationship, as well as cracking in the concrete, were found. The results will form the basis for program evaluation of fire resistance of structural elements.

(Поступила в редакцию 7 февраля 2013 г.)

ВВЕДЕНИЕ

Получение адекватных результатов с помощью модельной задачи [1–6], возможно только при правильном и полном описании свойств материалов. Такой сложный процесс как нагрев железобетонных элементов вплоть до их разрушения, невозможно описать линейной моделью. Создание моделей нелинейных свойств материалов здесь играют определяющую роль. Так понятно, что если элементы конструкций доводятся до полного разрушения, то материал (бетон, сталь арматуры) работает за пределами упругости. Следовательно, необходимо описывать поведение материала в области пластических деформаций. Кроме того, бетон на сжатие может работать за пределом прочности по нисходящей ветви диаграммы сжатия. Помимо этого, бетон подвержен трещинообразованию, которое значительно изменяет напряженно-деформированное состояние. Учет трещин является обязательным требованием при моделировании бетонных изделий. Все это усложняется тем, что железобетонные элементы находятся под действием нестационарного температурного поля. Поэтому все прочностные, упругие и тепловые параметры материалов будут зависеть от температуры.

В настоящее время для оценки огнестойкости используются два стандарта: 1) СТО 36554501-006-2006 «Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций», Москва 2006; 2) EN 1992-1-2:2004, ИДТ «Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-2. Общие правила определения огнестойкости», Минск 2010. Рекомендуемые свойства материалов в этих стандартах несколько отличаются.

1. Нелинейные свойства материала арматуры. Модель стали

Для решения задачи нестационарной теплопроводности необходимо задать следующие параметры: плотность, коэффициент теплопроводности и коэффициент теплоемкости для материалов арматуры. Для решения прочностной задачи необходимо иметь модуль продольной упругости, коэффициент Пуассона, коэффициент температурного

расширения (КТР) и диаграмму деформирования материала арматуры. Все параметры являются температурозависимыми.

1.1. Теплотехнические свойства материала арматуры

В геометрических моделях арматура обычно моделируется линейными телами (*link body*). Это означает, что при тепловом расчете температура в узлах КЭ арматуры будет соответствовать температуре в связанных с ними узлах КЭ бетона. В элементах с жесткой арматурой, у которых наблюдается перепад температуры по длине полок и высоте стенок жесткой арматуры, необходимо учитывать теплопроводность стали.

Теплотехнические свойства арматуры принимаем по СТО 36554501-006-2006 «Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций», Москва 2006:

- коэффициент теплопроводности стали
 $\lambda = 58 - 0,0048 \cdot T$, Вт/(м·°С),
- коэффициент теплоемкости стали
 $C = 480 - 0,63 \cdot T$, Дж/(кг·°С).

Теплофизические свойства стали будут оказывать влияние на температуру арматуры лишь в том случае, когда градиент температуры совпадает с продольной осью арматуры. Это будет иметь место при нагреве балок и колонн, для плит свойства стали практически не оказывают влияния на температуру арматуры.

1.2. Прочностные свойства материала арматуры. Модель упругопластического деформирования стали

Как известно диаграмма деформирования пластичных материалов, к которым относится сталь, имеет вид, представленный на рис. 1.

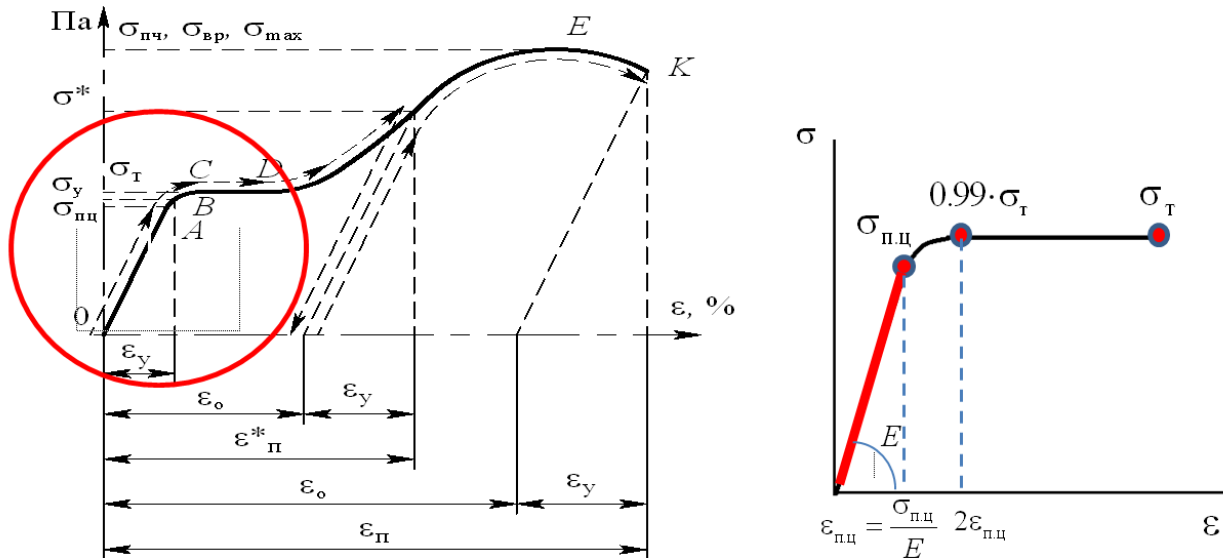


Рисунок 1 – Диаграмма деформирования стали при растяжении

Диаграммы растяжения некоторых материалов (рис. 1, слева), и в частности сталей, имеют значительную площадку текучести. В этом случае при расчетах за пределами упругости считают, что материал не имеет упрочнения и диаграмму растяжения схематизируют диаграммой упругопластического тела, имеющего модуль упрочнения равный нулю или близкий к нулю (рис. 1, справа). При этом будем предполагать, что

деформации арматуры не превысят величины, соответствующей окончанию площадки текучести $\varepsilon_{\text{пред}}$ на диаграмме растяжения (рис. 1, слева).

При расчетах за пределами упругости чаще всего используют двухлинейные диаграммы растяжения пластичных материалов. Первая зона определяется модулем упругости E и пределом пропорциональности $\sigma_{\text{п.п.}}$ и описывает упругие деформации, вторая зона – горизонтальный или почти горизонтальный участок описывает пластические деформации и определяется пределом текучести σ_{T} . Причем в модельной задаче принимают $\sigma_{\text{п.п.}} = \sigma_{\text{T}}$. Для моделирования процессов протекающих при высоких температурах подобная модель является достаточно грубо. Поскольку с ростом температуры в материале, его предел пропорциональности $\sigma_{\text{п.п.}}$ уменьшается значительно быстрее предела текучести σ_{T} , поэтому для решения поставленной задачи будем использовать трехлинейную диаграмму деформирования стали.

Модель упругопластического поведения стали построим по трем точкам (рис. 1, справа): $(\varepsilon_{\text{п.п.}} = \sigma_{\text{п.п.}}/E, \sigma_{\text{п.п.}})$, $(2\varepsilon_{\text{п.п.}}, 0,99\sigma_{\text{T}})$ и $(\varepsilon_{\text{пред.}}, \sigma_{\text{T}})$. Таким образом, получим трехлинейную модель с практически горизонтальной площадкой текучести.

Например, прочностные характеристики арматурной стали класса АIII представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Арматура обыкновенная стержневая горячекатаная класса А-III (А-400)

Показатель	Значение
Предел текучести σ_{T}^0 , МПа	390
Предел пропорциональности $\sigma_{\text{п.п.}}^0$, МПа	380
Модуль упругости E_s^0 , ГПа	200
Коэффициент Пуассона	0,3
Предельные деформации $\varepsilon_{\text{пред.}}$, %	1,25

В таблице 1 показаны значения характеристик прочности и модуля упругости при нормальной температуре $T_0 = 20$ °С. С ростом температуры эти параметры будут уменьшаться и при температуре T будут иметь значения

$$\sigma_{\text{T}}(T) = \gamma_{st} \sigma_{\text{T}}^0, \quad E(T) = \beta_{st} E_s^0, \quad \sigma_{\text{п.п.}}(T) = \gamma_{st}^{\text{п.п.}} \sigma_{\text{п.п.}}^0,$$

где γ_{st} – коэффициент снижения предела текучести стали;

β_{st} – коэффициент снижения начального модуля упругости стали;

$\gamma_{st}^{\text{п.п.}}$ – коэффициент снижения предела пропорциональности стали. Эти коэффициенты будем называть коэффициентами влияния.

Коэффициенты влияния зависят от температуры и определены экспериментально. Согласно СТО 36554501-006-2006 «Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций» их значение принимаются из табл. 2. В таблице полужирным начертанием указаны значения коэффициентов влияния для арматуры экспериментальных плит.

Таблица 2 – Значения коэффициентов влияния γ_{st} и β_s для классов арматур

Класс арматуры	Коэффициент	Значение коэффициентов γ_{st} , β_s при нагреве арматуры до температуры, °С							
		20	200	300	400	500	600	700	800
A240, A300, A400, A500	γ_{st}	<u>1,0</u> 1,0	<u>1,0</u> 1,0	<u>1,0</u> 1,0	<u>0,85</u> 1,0	<u>0,60</u> 1,0	<u>0,37</u> 1,0	<u>0,22</u> 0,92	<u>0,10</u> 0,85
	β_s	1,0	0,92	0,90	0,85	0,80	0,77	0,72	0,65
A540, A600, A800, A1000	γ_{st}	<u>1,0</u> 1,0	<u>1,0</u> 1,0	<u>0,96</u> 1,0	<u>0,80</u> 1,0	<u>0,55</u> 0,86	<u>0,30</u> 0,66	<u>0,12</u> 0,56	<u>0,08</u> 0,46
	β_s	1,0	0,90	0,85	0,80	0,76	0,70	0,66	0,61
B500, Bp1200, Bp1300, Bp1400, Bp1500, K1400, K1500	γ_{st}	<u>1,0</u> 1,0	<u>1,0</u> 1,0	<u>0,90</u> 1,0	<u>0,65</u> 0,90	<u>0,35</u> 0,80	<u>0,15</u> 0,60	<u>0,05</u> 0,50	<u>0,02</u> 0,40
	β_s	1,0	0,94	0,86	0,77	0,64	0,55	0,45	0,35

Примечания:
 1. Значения коэффициента γ_{st} над чертой и значения коэффициента β_s даны в нагретом состоянии, и они используются при расчете огнестойкости.
 2. Значения коэффициента γ_{st} под чертой даны после нагрева в охлажденном состоянии, и они используются при расчете огнесохранности.

Согласно результатам, полученным в диссертационной работе [4], коэффициент снижения предела пропорциональности для всех классов арматур имеет значения, представленные в табл. 3.

Таблица 3 – Значения коэффициента $\gamma_{st}^{п.ц}$ для классов арматур

Класс арматуры	Коэффициент	Значение коэффициента γ_{st} , при нагреве арматуры до температуры, °С							
		20	200	300	400	500	600	700	800
A240, A300, A400, A500, A540, A600, A800, A1000, B500, Bp1200 - Bp1500, K1400, K1500	$\gamma_{st}^{п.ц}$	1,0	0,97	0,82	0,49	0,22	0,10	0,02	0,01

Если принять, что при нормальной температуре предел пропорциональности можно положить равным

$$\sigma_{п.ц}^0 = 0.975 \cdot \sigma_T^0,$$

то для любой температуры трехлинейную диаграмму деформирования можно построить, используя модуль упругости, предел текучести и коэффициенты влияния из табл. 2 и 3.

$$\sigma_T(T) = \gamma_{st} \sigma_T^0, \quad E(T) = \beta_{st} E_0, \quad \sigma_{п.ц}(T) = \gamma_{st}^{п.ц} \sigma_{п.ц}^0 = 0,975 \cdot \gamma_{st}^{п.ц} \sigma_T^0.$$

На рис. 2 показан пример построения двух диаграмм, для температуры 20 °С и 500 °С для стали класса А-400.

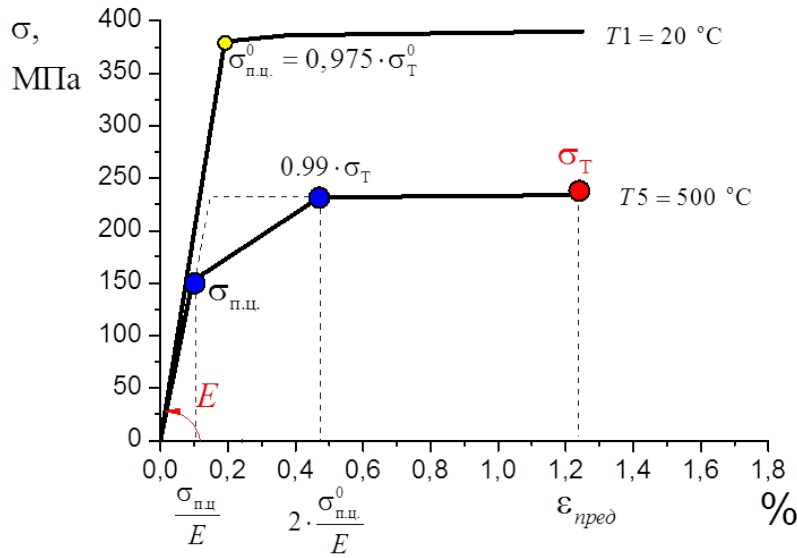


Рисунок 2 – MISO модель упругопластического поведения арматуры (Multilinear Isotropic Hardening)

Построение всех диаграмм автоматизировано и параметризовано. Созданы базы данных, включающие в себя коэффициенты влияния и КТР для всех классов арматурных сталей. То есть, для того чтобы задать модель упругопластического поведения материала арматуры, необходимо задать прочностные и упругие характеристики этого материала при нормальной температуре (рис. 3), выбрать число температурных зависимостей и сослаться на базу коэффициентов, соответствующих классу выбранной арматуры.

14	Static Structural (C1)			
15	P13	Mesh Element Size	23,438	mm
16	P14	Прочность бетона на сжатие, МПа	15,8	
17	P15	Прочность бетона на растяжение, МПа	1,2	
18	P16	Предельная деформация бетона на сжатие, %	0,2	
19	P17	Начальный модуль продольной упругости, ГПа	12,7	
20	P18	Козэффициент Пуассона бетона	0,2	
21	P19	Количество температурный зависимостей свойств бетона и стали	8	
22	P20	Промежуток сохранения данных, мин	5	
23	P21	Предел текучести стали, МПа	390	
24	P22	Модуль упругости стали, МПа	200	
25	P23	Казффициент Пуассона стали	0,3	
26	P24	Предельные деформации стали, %	1,25	

Рисунок 3 – Параметрическое определение диаграмм деформирования стали

В итоге получим упругопластическую температурозависимую модель деформирования арматуры, представленную на рис. 4.

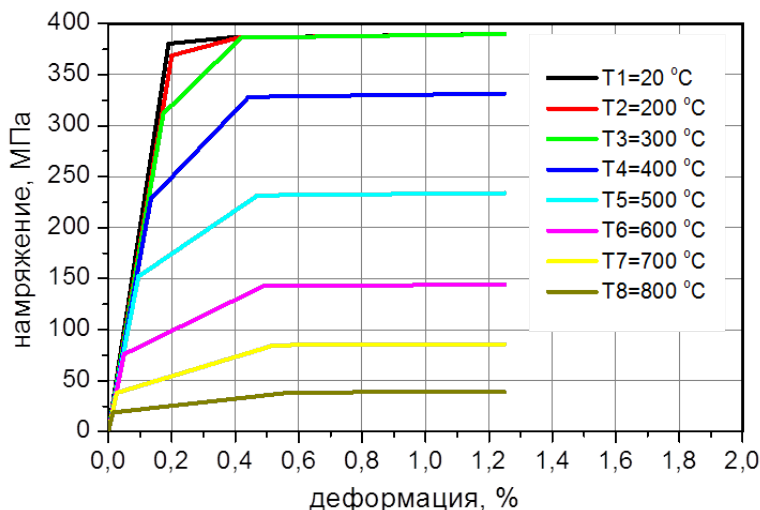


Рисунок 4 – Модель упругопластического температурозависимого деформирования арматурной стали

Температурные деформации арматуры определяются коэффициентом температурного расширения (КТР). Значение этого коэффициента соответствует табл. 4

Таблица 4 – Коэффициент температурного расширения арматурных сталей

Класс арматуры	Коэффициент температурного расширения арматуры $\alpha_{st} \cdot 10^{-6}, \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, при температуре, $^\circ\text{C}$								
	20	100	200	300	400	500	600	700	800
A240, A300, A400, A500, A540, A600, A800, A1000, B500, Bp1200 - Bp1500, K1400, K1500	11,5	12,0	12,5	13,0	13,5	14,0	14,5	15,0	15,5

С повышением температуры арматурная сталь расширяется. Коэффициент температурного расширения арматуры α_{st} с повышением температуры возрастает и он больше коэффициента температурной деформации бетона.

2. Нелинейные свойства бетонов. Модель бетона

Моделирование поведения бетона, является достаточно сложной задачей, поскольку это хрупкий материал, обладающий разными прочностными свойствами на сжатие и растяжение. Кроме того, при моделировании бетона обязательно необходимо учитывать трещинообразование, которое существенным образом изменяет напряженно-деформированное состояние.

Для решения задачи нестационарной теплопроводности необходимо задать значения коэффициентов теплопроводности и теплоемкости, а также плотность бетона как функции температуры.

Для решения прочностной задачи необходимо иметь модуль продольной упругости, коэффициент Пуассона, коэффициент температурного расширения (КТР), диаграммы деформирования бетона и модель трещинообразования. Все параметры являются температурозависимыми.

2.1. Теплотехнические свойства бетона

Температурное поле всего железобетонного элемента в подавляющей степени определяется тепловыми свойствами бетона. В том на сколько точно будут заданы эти свойства, зависит точность полученных температурных полей.

Теплотехнические свойства бетона принимаем по СТО 36554501-006-2006 «Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций», Москва 2006.

- Коэффициент теплопроводности бетона:
 - для тяжелого бетона на силикатном заполнителе
 $\lambda = 1,2 - 0,00035 T, \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$;
 - для тяжелого бетона на карбонатном заполнителе
 $\lambda = 1,14 - 0,00055 T, \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$;
 - для конструкционного керамзитобетона
 $\lambda = 0,36 - 0,00012 T, \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$.
- Коэффициент теплоемкости бетона:
 - для тяжелого бетона на силикатном и карбонатном заполнителях
 $C = 710 - 0,83 \cdot T, \text{ Дж/(кг}\cdot\text{°C)}$;
 - для конструкционного керамзитобетона
 $C = 830 - 0,42 \cdot T, \text{ Дж/(кг}\cdot\text{°C)}$.

Следует отметить, что зависимости для определения коэффициентов теплопроводности и теплоемкости, предлагаемые в двух стандартах (в СТО 36554501-006-2006 и в EN 1992-1-2:2004, ИДТ) существенно отличаются.

2.2. Прочностные свойства бетона. Модель упругопластического сжатия бетона

Как известно бетон относится к хрупким материалом. Он по-разному работает на растяжение и сжатие. На сжатие поведение бетона будет определяться моделью диаграммы сжатия, а на растяжение – моделью трещинообразования.

Диаграмма сжатия бетона качественно представлена на рисунке 5.

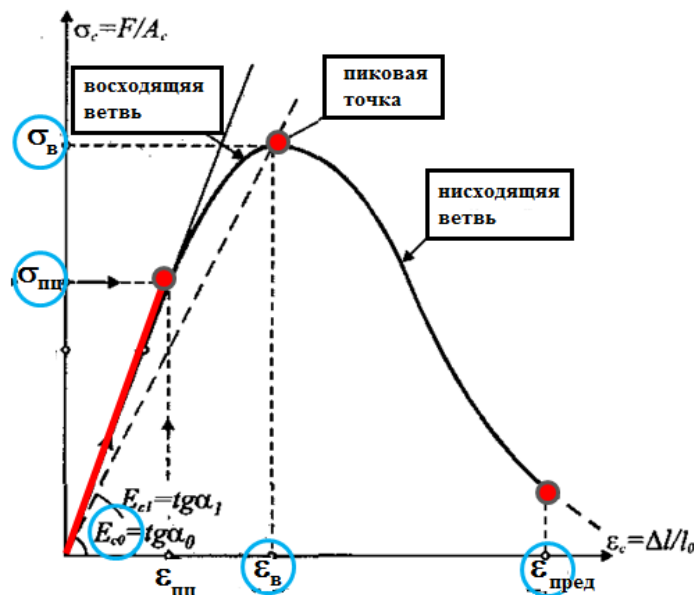


Рисунок 5 – Общий вид диаграммы сжатия бетона

В силу специфических свойств бетона как материала, его диаграмма состоит из двух характерных участков, которые принято называть *восходящей* и *нисходящей* ветвями. Восходящая ветвь описывает зависимость напряжений от деформаций до предела прочности бетона σ_B . Учет нисходящей ветви при моделировании поведения бетона является необходимым, так как за пределами прочности на сжатие бетон может воспринимать нагрузку.

При создании модельной диаграммы сжатия необходимо построить ее, используя ограниченное число параметров. Например, для конструкционного керамзитобетона известны следующие характеристики, представленные в табл. 5.

Таблица 5 – Характеристики конструкционного керамзитобетона

Показатель	Значение
Предел прочности σ_B^0 , МПа	
– при сжатии	15,8
– при растяжении	1,2
Начальный модуль упругости E_0 , ГПа	12,7
Предельные деформации ε_B^0	
– при сжатии	0,2 %
– при растяжении	0,015 %

Построим четырехлинейную модель поведения бетона при сжатии, используя значения предела прочности при сжатии σ_B^0 , предельной деформации, соответствующей этому пределу ε_B^0 и начальному модулю упругости E_0 .

Восходящая ветвь моделируется тремя участками. Первый участок определяется начальным модулем упругости и пределом пропорциональности бетона, который мы примем $\sigma_{пл} = 0,6 \cdot \sigma_B$. Пиковая точка на рис. 5 моделируется практически горизонтальной площадкой в интервале деформаций $0,7 \cdot \varepsilon_B - \varepsilon_B$.

Нисходящая ветвь моделируется одним участком в интервале деформаций $\varepsilon_B - 1,2 \cdot \varepsilon_B$. При этом напряжения в бетоне падают до величины $0,1 \cdot \sigma_B$. При дальнейшем деформировании этот уровень напряжений будем сохранять, что позволит улучшить сходимость итерационных циклов при прочностном расчете. Упругопластическая модель поведения бетона при сжатии показана на рис. 6.

Модель на рис. 6 построена по трем параметрам: пределу прочности бетона на сжатие σ_B , предельной деформации, соответствующей пределу прочности ε_B и модулю упругости E , значения которых при нормальной температуре задаются в окне параметров Ansys Workbench, рис. 7.

Влияние температуры на указанные параметры учитывается с помощью коэффициентов влияния для бетона следующим образом:

$$\sigma_B(T) = \gamma_{bt} \sigma_{B0},$$

$$E(T) = \beta_{bt} E_0,$$

где γ_{bt} – коэффициент снижения предела прочности бетона при сжатии,

β_{bt} – коэффициент снижения начального модуля упругости бетона.

В диссертационной работе [4] показано, что с достаточной точностью для описания диаграмм сжатия бетона при различных температурах можно положить

$$\varepsilon_B(T) = \varepsilon_{B0} / \beta_{bt}.$$

Согласно СТО 36554501-006-2006 «Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций» их значение принимаются из табл. 6.

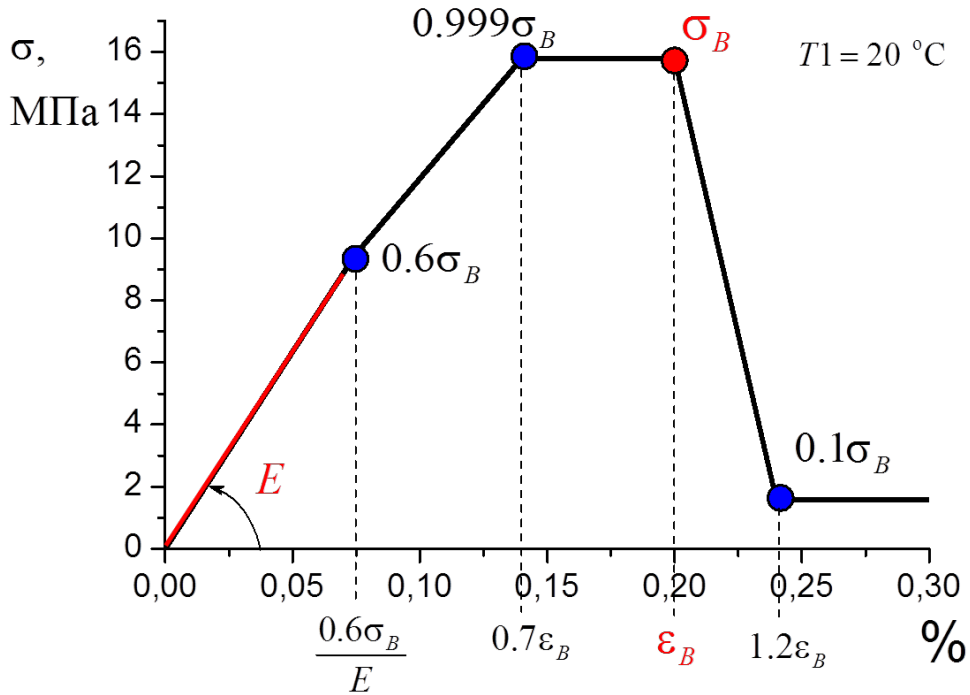


Рисунок 6 – KINH модель уругопластического поведения бетона при сжатии (Multilinear Kinematic Hardening)

14	Static Structural (C1)			
15	P13	Mesh Element Size	23,438	mm
16	P14	Прочность бетона на сжатие, МПа	15,6	
17	P15	Прочность бетона на растяжение, МПа	1,2	
18	P16	Предельная деформация бетона на сжатие, %	0,2	
19	P17	Начальный модуль продольной упругости, ГПа	12,7	
20	P18	Кэффициент Пуассона бетона	0,2	
21	P19	Количество температурный зависимостей свойств бетона и стали	8	
22	P20	Пронезуток сохранения данных, мин	5	
23	P21	Предел текучести стали, МПа	390	
24	P22	Модуль упругости стали, МПа	200	
25	P23	Казффициент Пуассона стали	0,3	
26	P24	Предельные деформации стали, %	1,25	

Рисунок 7 – Параметрическое определение модели деформирования бетона

Таблица 6 – Значения коэффициентов влияния γ_{st} и β_b для типов бетона

Вид бетона	Коэффициент	Значение коэффициентов γ_{bt} , β_b для бетона при температуре, °С							
		20	200	300	400	500	600	700	800
Тяжелый, на силикатном заполнителе	γ_{bt}	<u>1,0</u> 1,0	<u>0,98</u> 0,95	<u>0,95</u> 0,90	<u>0,85</u> 0,80	<u>0,80</u> 0,70	<u>0,60</u> 0,50	<u>0,20</u> -	<u>0,10</u> -
	β_b	1,0	0,70	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10	0,05
Тяжелый на карбонатном заполнителе	γ_{bt}	<u>1,0</u> 1,0	<u>1,0</u> 0,95	<u>0,95</u> 0,90	<u>0,90</u> 0,85	<u>0,85</u> 0,80	<u>0,65</u> 0,60	<u>0,30</u> -	<u>0,15</u> -
	β_b	1,0	0,75	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	0,10
Конструкционный керамзитобетон	γ_{bt}	<u>1,0</u> 1,0	<u>1,0</u> 1,0	<u>1,0</u> 1,0	<u>0,95</u> 1,0	<u>0,85</u> 0,95	<u>0,70</u> 0,80	<u>0,50</u> -	<u>0,25</u> -
	β_b	1,0	0,85	0,80	0,70	0,60	0,45	0,30	0,15

Примечания:
 1. Значения коэффициентов γ_{bt} над чертой и β_b даны в нагретом состоянии, и они используются при расчете огнестойкости.
 2. Значения коэффициентов γ_{bt} под чертой даны после нагрева в охлажденном состоянии, и они используются при расчете огнесохранности.

В табл. 6 полужирным начертанием указаны значения коэффициентов влияния для бетона экспериментальных плит.

Построение моделей диаграмм сжатия бетона для различных температур автоматизировано. Созданы базы данных для различных типов бетонов, включающие в себя коэффициенты влияния и КТР и усадки бетона. Для создания модели упругопластического сжатия бетона, необходимо задать прочностные и упругие характеристики этого материала при нормальной температуре (рис. 7), выбрать число температурных зависимостей и сослаться на базу коэффициентов, соответствующих типу выбранного бетона.

В итоге получим упругопластическую температурозависимую модель сжатия бетона, представленную на рис. 8.

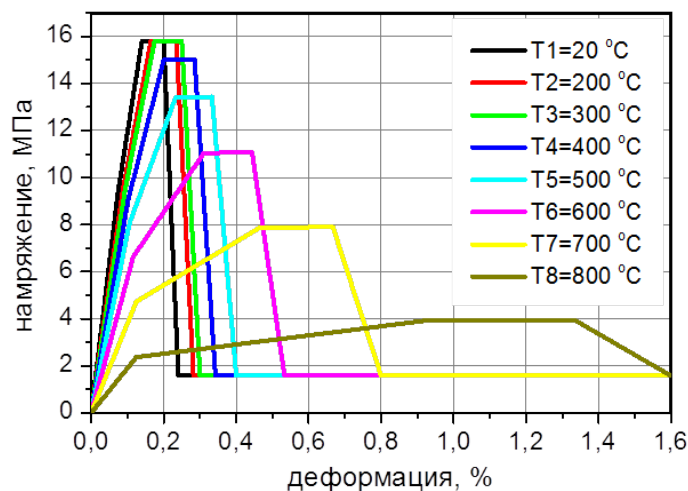


Рисунок 8 – Модель упругопластического температурозависимого сжатия бетона

Температурные деформации бетона делятся на обратимые деформации температурного расширения и необратимые деформации температурной усадки. Значения коэффициентов температурного расширения и температурной усадки бетона принимаются по табл. 6 и 7 соответственно.

Таблица 6 – Коэффициенты температурного расширения бетона

Вид бетона	Коэффициент температурного расширения бетона $\alpha_{bt} \cdot 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$, при температуре бетона, $^\circ\text{C}$				
	20 - 50	100	300	500	700 - 1100
Тяжелый на силикатном заполнителе	9	9	8	11	14,5
Тяжелый на карбонатном заполнителе	10	10	9	12	15,5
Конструкционный керамзитобетон	8,5	8,5	7	5,5	4,5

Таблица 7 – Коэффициенты температурной усадки бетона

Вид бетона	Коэффициент температурной усадки бетона $\alpha_{cs} \cdot 10^{-6}, ^\circ\text{C}^{-1}$, при температуре бетона, $^\circ\text{C}$				
	20 - 50	100	300	500	700 - 1100
Тяжелый на силикатном заполнителе	0,5	1,0	1,0	-1,8	-6,8
Тяжелый на карбонатном заполнителе	0,5	1,5	1,1	1,3	1,5
Конструкционный керамзитобетон	2	2	1,5	1,5	1,5

При нагреве плиты приведенный коэффициент температурного расширения будет равен разности КТР и коэффициента температурной усадки бетона.

2.3. Модель трещинообразования в бетоне

В областях сжатия бетон будет работать по модели сжатия, представленной на рис. 8, а в области растяжения по модели трещинообразования. В Ansys имеется возможность моделировать такой процесс. Возможность описания трещин реализована в КЭ SOLID65. Этот конечный элемент был специально создан для моделирования поведения бетона.

Необходимо для КЭ SOLID65 подключить команду «conkt» и в качестве ее параметров задать следующие значения:

- коэффициента передачи касательных напряжений открытой трещиной (согласно рекомендациям моделирования бетона принимаем 0,3);
- коэффициента передачи касательных напряжений закрытой трещиной (принимаем 0,9);
- предел прочности бетона на растяжение σ_B^p (табл. 5, рис. 7);
- коэффициент релаксации напряжений после образования трещины (примем 0,1 для лучшей сходимости итерационного цикла решения).

Предел прочности бетона при растяжении, является величиной зависящей от температуры (с ростом температуры уменьшается)

$$\sigma_B^p(T) = \gamma_{tt} \sigma_{B0}^p,$$

где γ_{tt} – коэффициент снижения предела прочности при растяжении.

Согласно СТО 36554501-006-2006 «Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций» его значение принимаются из табл. 8.

Таблица 8 – Коэффициенты снижения предела прочности при растяжении бетона

Вид бетона	Коэффициент	Значение коэффициентов γ_{bt} , β_b для бетона при температуре, °С							
		20	200	300	400	500	600	700	800
Тяжелый, на силикатном заполнителе	γ_{bt}	1,0	0,65	0,50	0,35	0,20	0,05	-	-
		1,0	0,60	0,45	0,30	0,15	0,03	-	-
Тяжелый на карбонатном заполнителе	γ_{bt}	1,0	0,70	0,55	0,40	0,25	0,10	-	-
		1,0	0,65	0,50	0,35	0,20	0,05	-	-

Примечания:
 1. Значения коэффициентов γ_{bt} над чертой даны в нагретом состоянии, и они используются при расчете огнестойкости.
 2. Значения коэффициентов γ_{bt} под чертой даны после нагрева в охлажденном состоянии, и они используются при расчете огнесохранности.

Модуль упругости бетона при растяжении с ростом температуры изменяется так же как и при сжатии.

Модель трещинообразования при растяжении бетона показана на рис. 9.

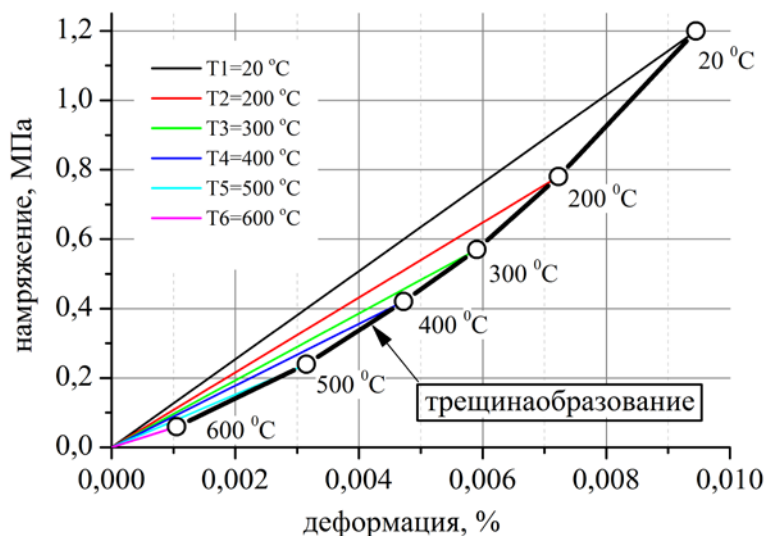


Рисунок 9 – Модель трещинообразования в бетоне при растяжении

Таким образом, при расчете железобетонного элемента конструкции арматурная сталь будет работать согласно модели на рис. 4, бетон на сжатие, согласно модели на рис. 8, на растяжение – согласно модели на рис. 9.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализованная математическая модель позволяет учесть запредельное поведение бетона (при напряжениях и деформациях выше критических) с учетом его пластичности и возможных сдвиговых деформаций, что наиболее полно описывает поведение материала при

нагружении изгибом с учетом арматуры. В данном случае сопротивление железобетонных конструкций обусловлено наличием арматуры и ее взаимодействием с блоками бетона. Проведен анализ компонентов вычислительной среды ANSYS, определены их возможности по учету температурных и силовых воздействий, возникающих в конструкциях при пожаре. Разработаны параметрические модели железобетонных плит, балок и колонн, построены нелинейные модели материалов бетона и арматурной стали, включающие упруго-пластические, температурозависимые диаграммы деформирования, а также трещинообразование в бетоне, которые будут положены в основу программ оценки огнестойкости элементов конструкций.

Все расчеты, представленные в работе, проведены по теплотехническим свойствам материалов, принятых по СТО 36554501-006-2006 «Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций» (Москва, 2006 г.). По аналогии можно получить результаты, взяв рекомендуемые свойства материалов по EN 1992-1-2:2004, IDT «Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-2. Общие правила определения огнестойкости» (Минск, 2010 г.).

Результаты исследований носят прикладной характер и могут быть использованы при проведении расчетов огнестойкости железобетонных конструкций каркасных зданий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Милованов, А.Ф. Огнестойкость железобетонных конструкций / А.Ф. Милованов, – М. : Стройиздат, 1998. – 224с. : ил.
2. Учебно-методическое пособие в помощь специалистам проектных и монтажных организаций. Раздел I: Противопожарная защита высотных зданий и уникальных объектов. ООО ПКФ «Эндемик». Москва. – 2004. – 85 с.
3. Левитский, Е.В. Диаграммный метод решения статической задачи расчета огнестойкости железобетонных конструкций [Электронный ресурс]: Дис. канд. техн. наук: 05.23.01. М. : РГБ, 2007. (Из фондов Российской Государственной Библиотеки).
4. Тимошенко, С. П. Сопротивление материалов: в 2 т. / пер. с англ. – М. : Наука, Т. 1 : Элементарная теория и задачи, 1965. – 363 с.; Т. 2: Более сложные вопросы теории и задачи, 1965. – 480 с.
5. Willam, K. J. Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete / K. J. Willam, E. D. Warnke // Proceedings, International Association for Bridge and Structural Engineering – 1975. – Vol. 19. – P. 174.
6. Wilson, E. L. Incompatible Displacement Models / E. L. Wilson, R. L. Taylor, W. P., Doherty, J. Ghaboussi // Numerical and Computer Methods in Structural Mechanics. edited by S. J. Fenves, et al.. Academic Press, Inc.. N. Y. and London. – 1973. – P. 43–57.
7. Taylor, R. L. A Non-Conforming Element for Stress Analysis / R. L. Taylor, P. J. Beresford, E. L. Wilson // International Journal for Numerical Methods in Engineering – 1976. – Vol. 10. – P. 1211–1219.
8. Schnobrich, W. C. Finite Element Analysis of Reinforced Concrete / W. C. Schnobrich, M. Suidan // ASCE Journal of the Structural Division. ST10. – 1973. – P. 2109–2122.
9. MacGregor, J.G. Reinforced Concrete Mechanics and Design // Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ. 1992.
10. Nawy, E.G. Prestressed Concrete: A Fundamental Approach // Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ. 2000.
11. Branson, D.E. Loss of Prestress, Camber and Deflection of Noncomposite and Composite Structures Using Different Weight Concrete / D.E. Branson, B.L. Meyers, K.M. Kripanarayanan // Iowa State Highway Commission, Report. – 1970. – № 70. – P. 6.