



Огнестойкость строительных конструкций

профессор Фёдоров Виктор Сергеевич

Практика показывает, что отрицательным результатом технического прогресса является возрастание числа пожаров различной сложности.

В Российской Федерации за один год в среднем происходит 250 тыс. пожаров, уничтожаются ценности на 44 млрд. руб., погибает свыше 18 тыс. человек и ещё большее количество людей получают травмы.

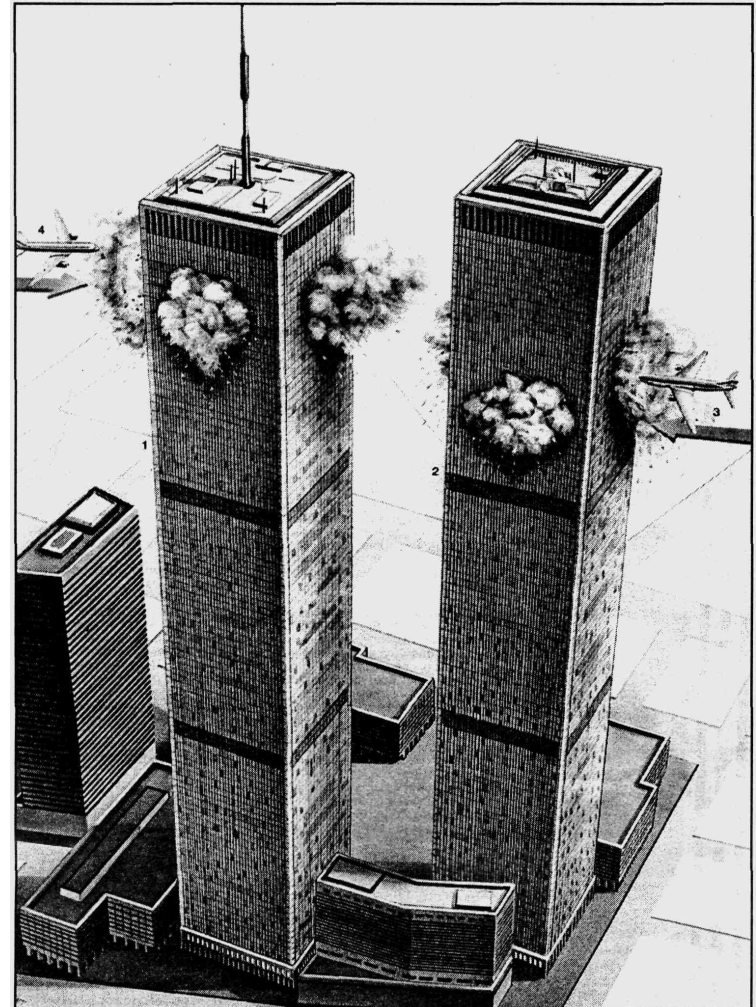
Пожар в здании Всемирного торгового центра в Нью-Йорке (2001 г.)

При проектировании был проведён расчёт на прочность от удара самолёта (Боинг-707, вес 150 т).

Каждая башня выдержала удар самолёта Боинг-767, который весил примерно на 30 т больше.

Пожар начался от разлива топлива из баков самолётов, которые были заполнены на 70 %.

Температура 1000...1200°C вызвала быстрый нагрев стальных элементов каркаса на этаже, потерю ими несущей способности и в результате - лавинообразное разрушение башен (соответственно через **103** и **62** минуты после удара).





Пожар и его опасные факторы

Пожар – неконтролируемое горение, приводящее к ущербу.

На развитие пожара влияют следующие факторы:

- пожарная (тепловая) нагрузка, то есть общее количество сгораемых материалов в помещении;
- воздухообмен (площадь помещения, площадь и количество проёмов);
- природа материала ограждающих и несущих конструкций.

Опасные факторы пожара:

- высокая температура (до 1000-1500 °С);
- задымление;
- изменение состава газовой среды.

Долговечность и огнестойкость конструкций

Долговечность – способность конструкций сохранять эксплуатационные функции в течение заданного срока службы.

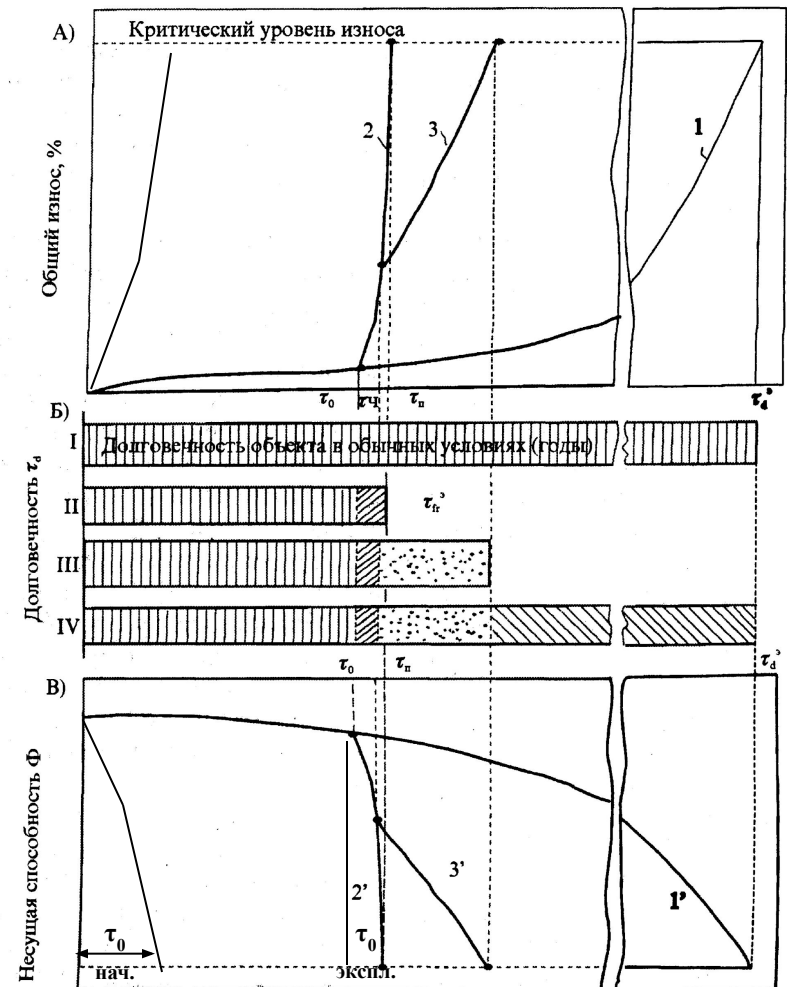
Огнестойкость – способность конструкции при пожаре сохранять несущие и (или) ограждающие функции при пожаре.

Характерна общность физических процессов утраты эксплуатационных качеств конструкциями. Основной фактор пожара – высокая температура интенсифицирует процессы утраты несущей способности вплоть до разрушения в течение десятков минут.

А – износ: 1 – обычные условия; 2 – полная утрата возможности эксплуатации; 3 – то же, частичная.

Б – долговечность: I – в обычных условиях; II-IV – при пожаре;

В – утрата прочности: 1' – в обычных условиях; 2'-3' – при пожаре.



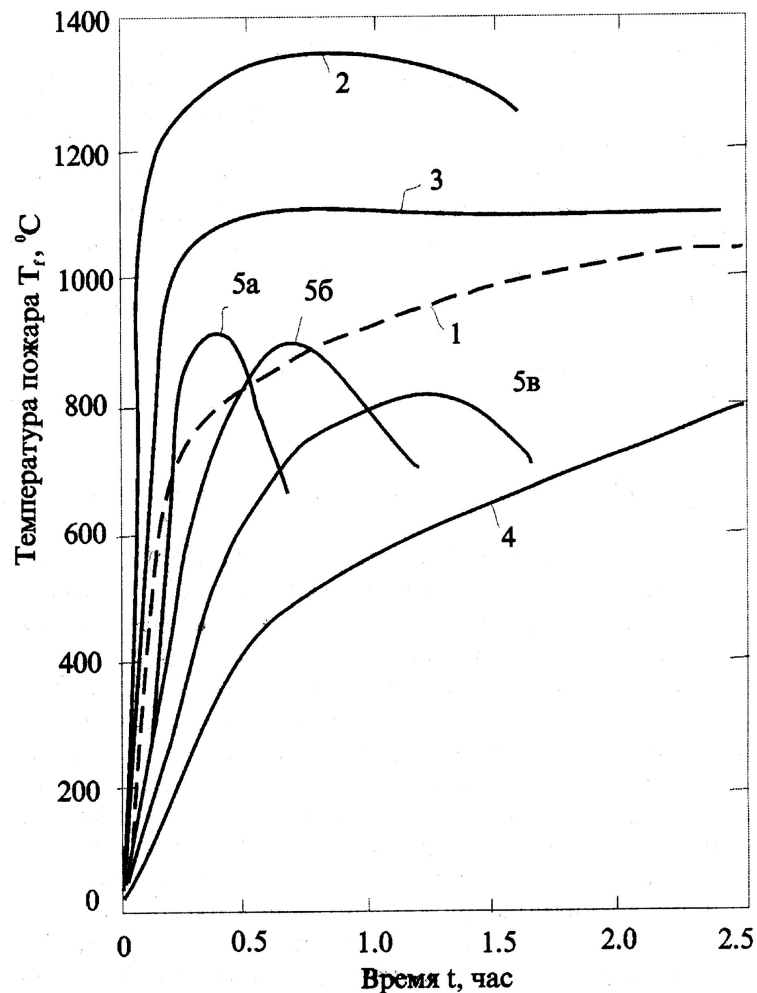
Температурные режимы пожаров

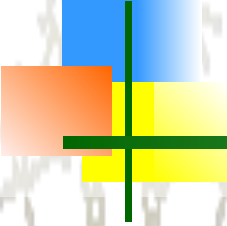
- 1 – стандартное огневое воздействие при определении предела огнестойкости конструкций;
- 2 – режим пожара в тоннелях;
- 3 – режим пожара в зданиях и сооружениях нефтеперерабатывающей промышленности;
- 4 – режим пожара в подвальном помещении;
- 5 – режим пожара в жилом помещении с различной площадью проёмов (5а) – 2 м²; (5б) – 1,5 м²; (5в) – 1,0 м².

Стандартный температурный режим теплового воздействия на конструкцию

$$T = 345 \lg(8t + 1) + 20;$$

T – температура, °С; t – время, мин.





«Жёсткое» и «гибкое» противопожарное нормирование

«Жёсткое» нормирование

- Предел огнестойкости конструкции определяется только по режиму стандартного воздействия, что не позволяет оптимизировать соотношение между степенью защиты и уровнем затрат на защиту;

«Гибкое» нормирование (объектно-ориентированное)

- Предел огнестойкости определяется исходя из реального режима пожара, с учётом физико-химических и пожароопасных свойств материалов, а также конструктивных и объёмно-планировочных решений здания; требования огнестойкости соответствуют реальным условиям работы конструкций в конкретном здании;
- Учёт особенностей воздействия реального пожара позволяет проектировать конструкции с заданным уровнем безопасности при пожаре и заданной степенью сохранности эксплуатационных качеств (живучести) после пожара, оптимизировать затраты на обеспечение требуемой огнестойкости, а в некоторых случаях – повысить уровень пожарной безопасности.

Температурные режимы пожаров

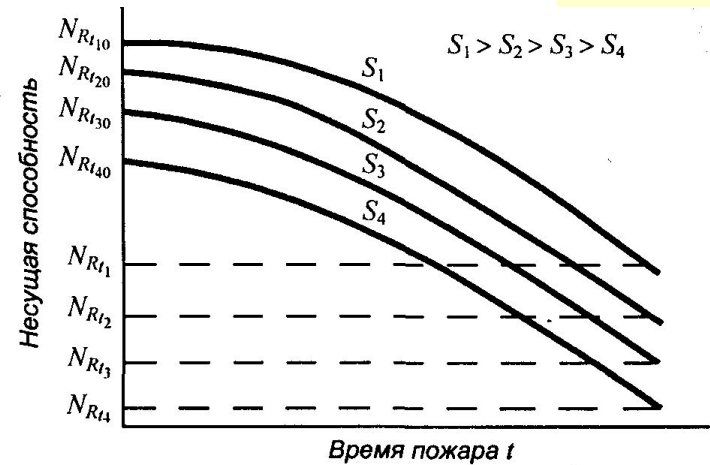
Определение эквивалентной продолжительности пожара по потере несущей способности конструкции

S_i – сечения конструкций с заданным процентом армирования

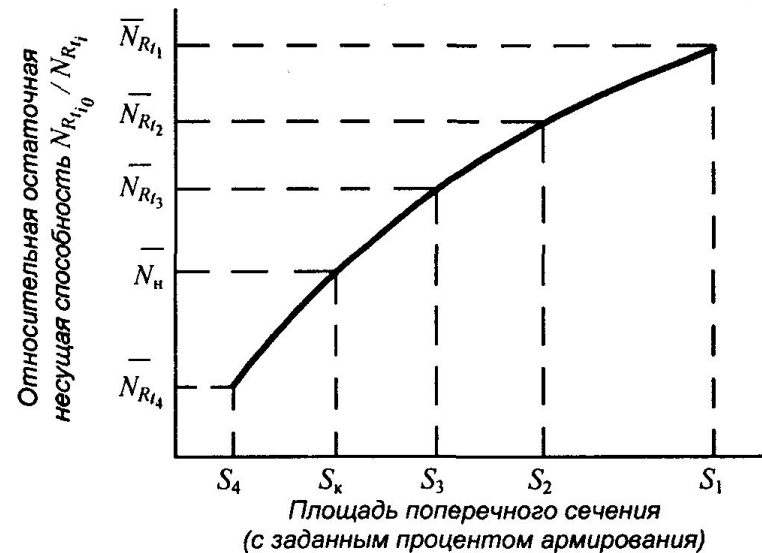
N_H – нормативная нагрузка;

N_{Rt0} – начальное значение несущей способности;

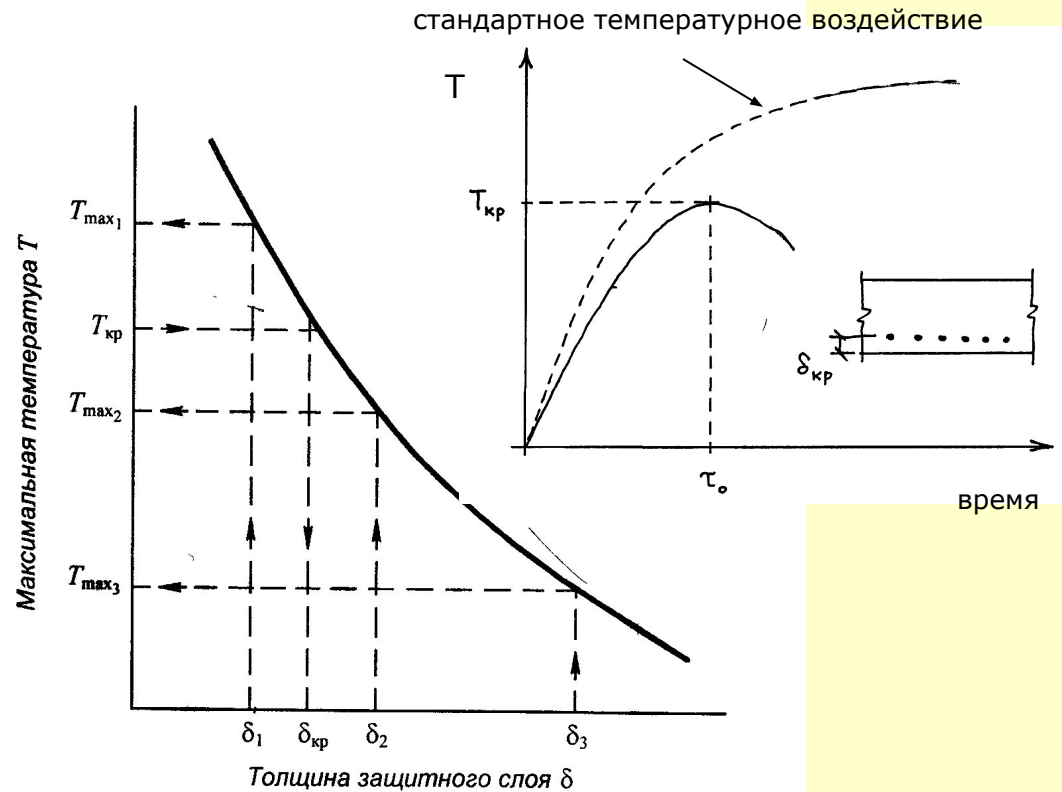
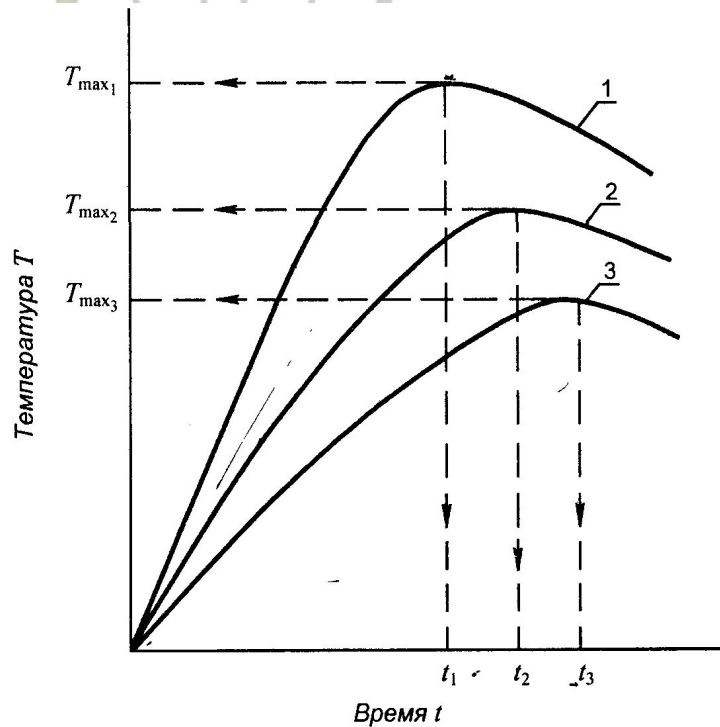
N_{Rti} – несущая способность при тепловом воздействии.



б



Переход от «реального» пожара к стандартному



1, 2, 3 – кривые прогрева защитных слоёв, соответственно толщиной δ_1 ; δ_2 ; δ_3 ; t – время прогрева слоёв до максимальных температур T_{\max}



Степень огнестойкости здания

Степень огнестойкости здания

- согласно СНиП 21-01-97* определяется показателями огнестойкости и пожарной опасности конструкций;

Здесь заложено противоречие в определении степени огнестойкости для проектирования, так как её нормирование в зависимости от пожарно-технических характеристик здания является первичным относительно пределов огнестойкости и классов пожарной опасности конструкций.

- согласно стандарту ИСО 383-87 нормируемая степень огнестойкости здания устанавливается в зависимости от назначения, количества этажей, площади пожарных отсеков, тепловой нагрузки и т.д.

Пределы огнестойкости конструкций

Таблица 4* СНИП 21-01-97*

Степень огнестойкости здания	Предел огнестойкости строительных конструкций, не менее						
	Несущие элементы здания	Наружные несущие стены	Перекрытия междуэтажные (в том числе чердачные и над подвалами)	Элементы бесчердачных покрытий		Лестничные клетки	
				Настилы (в том числе с утеплителем)	Фермы, балки, прогоны	Внутренние стены	Марши и площадки лестниц
I	R 120	E 30	REI 60	RE 30	R 30	REI 120	R 60
II	R 45	E 15	REI 45	RE 15	R 15	REI 90	R 60
III	R 45	E 15	REI 45	RE 15	R 15	REI 60	R 45
IV	R 15	E 15	REI 15	RE 15	R 15	REI 45	R 15
V	не нормируется						

Класс пожарной опасности конструкций

Таблица 5* СНиП 21-01-97*

Класс конструктивной пожарной опасности здания	Класс пожарной опасности строительных конструкций, не ниже				
	Несущие стержневые элементы (колонны, ригели, фермы и др.)	Стены наружные с внешней стороны	Стены, перегородки, перекрытия и бесчердачные покрытия	Стены лестничных клеток и противопожарные преграды	Марши и площадки лестниц в лестничных клетках
С0	К0	К0	К0	К0	К0
С1	К1	К2	К1	К0	К0
С2	К3	К3	К2	К1	К1
С3	Не нормируется			К1	К3

При установлении класса пожарной опасности учитываются:

- наличие теплового эффекта от горения;
- наличие пламенного горения газов;
- размеры и характер повреждений;
- характеристики пожарной опасности материалов, составляющих конструкцию.

Огнестойкость железобетонных конструкций

Следует различать понятия:

потеря огнестойкости СК- потеря способности конструкции сохранять свои функции при пожаре. Определяется временем от начала огневого воздействия «реального» пожара до момента потери огнестойкости;

предел огнестойкости СК от начала огневого стандартного воздействия до возникновения предельного состояния – нормативная величина.

Основные факторы, определяющие огнестойкость железобетонных конструкций:

- вид бетона и его физико-механические характеристики, включая влажность;
- форма и размеры элементов;
- статическая схема;
- условия нагрева и тепловая нагрузка.

Аналитическая аппроксимация температурных зависимостей основных параметров диаграмм термомеханического состояния бетона

- Коэффициент снижения прочности бетона при нагреве:
- Коэффициент снижения начального модуля деформаций бетона при нагреве:

где $t_{b,i}$ – температура нагрева бетона; t_0 – начальная температура ($t_0 = 20^\circ\text{C}$); γ, β, m, n – опытные параметры; 1000 – размерный коэффициент.
- Температурные деформации бетона:

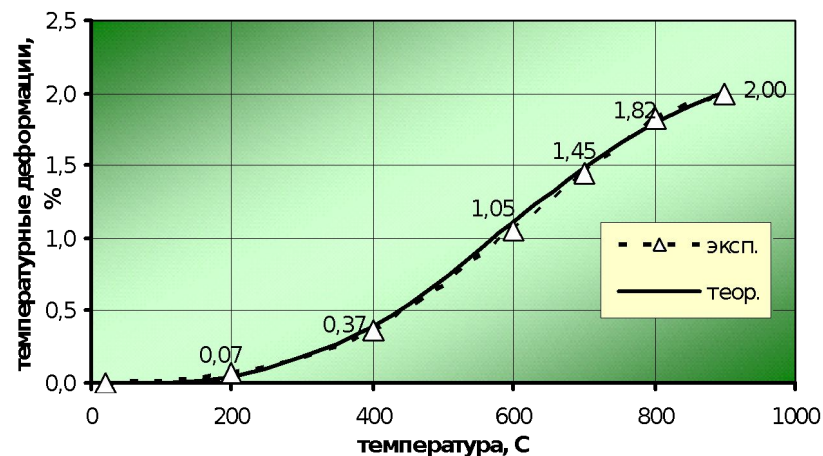
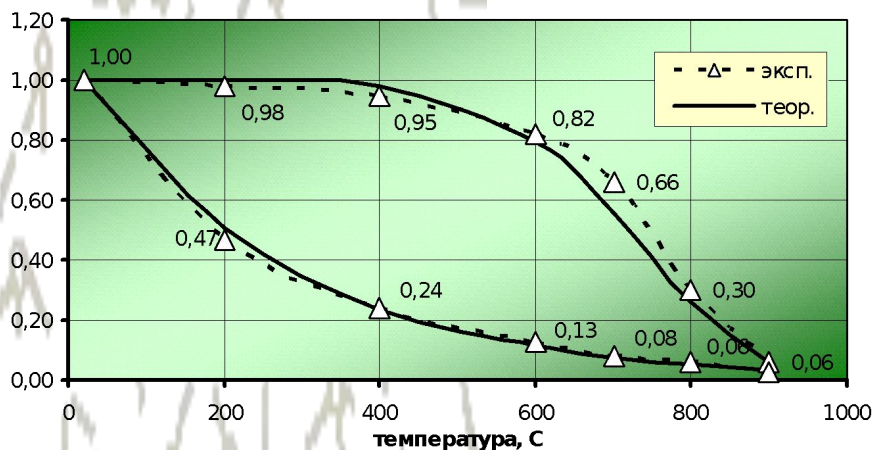
где $\alpha, p, \varepsilon_\alpha$ – опытные параметры.

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

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

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

Тяжёлый бетон на известняковом заполнителе

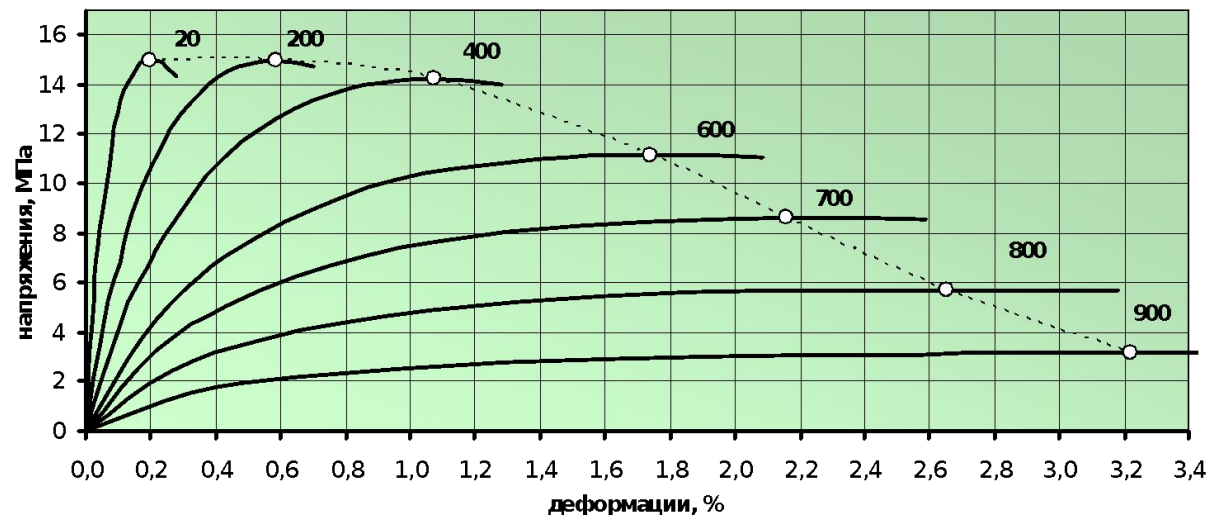


4

4

Диаграмма термомеханического состояния бетона

Диаграммы деформирования бетона при различных температурах нагрева, построенные по предлагаемой методике
(бетон тяжёлый класса В20 на гранитном заполнителе)



Предлагаемое выражение позволяет

- ✓ Использовать в расчёте непосредственно коэффициенты секущего модуля;
- ✓ Описывать единой зависимостью восходящую и нисходящую ветвь;
- ✓ Учитывать изменение характера нелинейности диаграмм при их трансформации без применения дополнительных опытных коэффициентов.

Функциональные зависимости для описания диаграмм деформирования бетона

- Уравнение связи между напряжениями и деформациями бетона:
- Функциональная зависимость для коэффициента секущего модуля :
- Уровень деформаций:
- Параметр нелинейности диаграммы k_t определяется из условия, что в вершине диаграммы коэффициент секущего модуля равен своему предельному значению:
- Показатель m определяется из условия, что угол наклона касательной в вершине диаграммы равен нулю:
- Тогда выражение для коэффициента секущего модуля:

$$\text{при } \eta_{\varepsilon,ti} < \eta_{\varepsilon}^{(\max)} : v_{b,ti} = \exp[-k_{ti}(\eta_{\varepsilon,ti})^{1/k_{ti}}]$$

$$\text{при } \eta_{\varepsilon,ti} \geq \eta_{\varepsilon}^{(\max)} : v_{b,ti} = 0$$

- Максимальный уровень деформаций:

При однородном напряжённом состоянии:

$$\eta_{\varepsilon}^{(\max)} = 1,0$$

При неоднородном напряжённом состоянии:

$$\eta_{\varepsilon}^{(\max)} = 1,8$$

$$\sigma_{b,ti} = \varepsilon_{b,ti} \cdot E_{b,ti} \cdot v_{b,ti}$$

$$v_{b,ti} = \exp[-k_{ti}(\eta_{\varepsilon,ti})^m]$$

$$\eta_{\varepsilon,ti} = \frac{\varepsilon_{b,ti}}{\varepsilon_{bu,ti}}$$

$$k_{ti} = -\ln(v_{bu,ti})$$

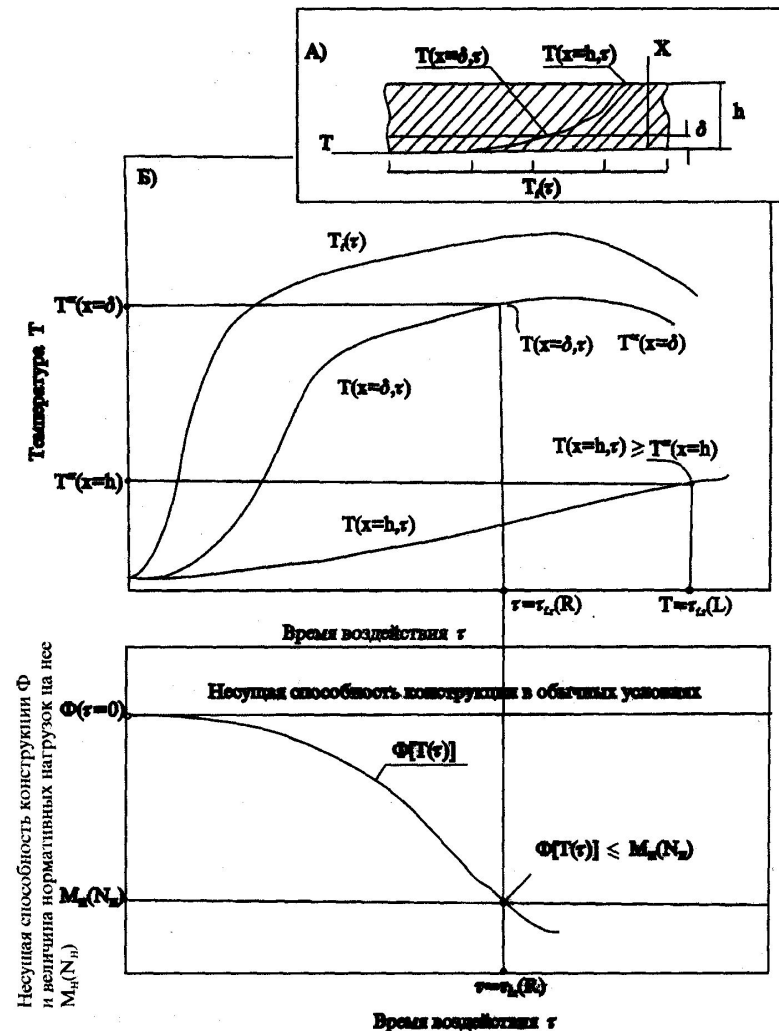
$$m = \frac{1}{k_{ti}}$$

Огнестойкость железобетонных конструкций

Предел огнестойкости изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных конструкций по несущей способности определяется нагревом рабочей растянутой арматуры до критической температуры.

Критическая температура – это температура, при которой её сопротивление снизится до величины напряжений от внешней нагрузки.

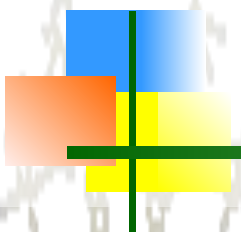
- А – расчётная схема;
- Б – решение теплотехнической задачи;
- В – решение статической задачи.



Влияние размеров элемента и вида бетона

Характеристика конструкций	Размеры, см		Предел огнестойкости, мин
	из тяжёлого бетона	из лёгкого бетона (1200 кг/м ³)	
Плиты, опёртые по двум сторонам при толщине защитного слоя а	а = 15	а = 10	R30
	а = 35	а = 30	R90
	а = 60	а = 50	R150
	а = 70	а = 55	R180
Колонны шириной b и толщиной защитного слоя а при воздействии огня со всех сторон	b = 150; а = 10	b = 150; а = 10	R30
	b = 240; а = 35	b = 190; а = 35	R90
	b = 400; а = 50	b = 320; а = 40	R150
	b = 450; а = 50	b = 360; а = 40	R180

Для несущих конструкций высотных зданий установлен предел огнестойкости R240 (4 часа)

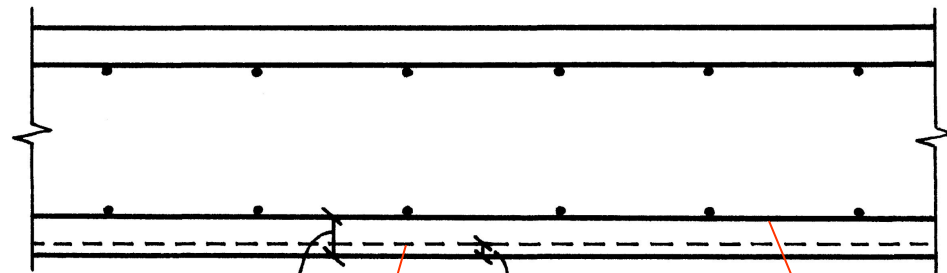


Огнестойкость железобетонных конструкций



Огнестойкость железобетонных конструкций

Поперечный разрез плиты перекрытия



50-60 мм

сетка \varnothing 3-5 мм

основная сетка

15-20 мм для предохранения от образования и развития начальных трещин при изготовлении;

25-40 мм (противоткольная сетка).

Это требует специальных исследований по величине расположения сетки.

Огнестойкость статически неопределимых железобетонных конструкций

Предел огнестойкости статически неопределимых конструкций выше, чем у статически определимых.

Отношение площади арматуры над опорой к площади арматуры в пролёте	Увеличение предела огнестойкости изгибаемого статически неопределимого элемента, %, по сравнению с пределом огнестойкости статически определимого элемента
0,25	10
0,5	25
1	50
2	150

При тепловом воздействии изменяются жёсткостные характеристики сечений элементов, что приводит к перераспределению усилий от нагрузки

Исходные гипотезы и основные соотношения деформационной модели термосилового сопротивления нормальных сечений железобетонных элементов

Общие гипотезы

Статические

Элемент может испытывать растяжение (или сжатие) от действия продольной силы N и изгиб от действия момента M . На всех стадиях работы элемент находится в состоянии равновесия.

Геометрические

В качестве закона, определяющего совместность деформаций компонентов сечения, используем гипотезу плоских сечений.

Физические

Связь между напряжениями и деформациями для каждого компонента сечения остаётся такой же, как и при стандартных испытаниях эталонных образцов.

Специфическая гипотеза

Полные деформации компонентов сечения, определяемые гипотезой плоских сечений, равны сумме силовых и температурных деформаций, которые считаются независимыми.

Основные соотношения:

$$N = \sum_i \sigma_{b,ti} A_{b,i} + \sum_j \sigma_{s,tj} A_{s,j}$$

$$M = \sum_i \sigma_{b,ti} y_{b,i} A_{b,i} + \sum_j \sigma_{s,tj} y_{s,j} A_{s,j}$$

$$\varepsilon_{b,ti}^{(tot)} = \varepsilon_t + \chi_t \cdot y_{b,i}$$

$$\varepsilon_{s,tj}^{(tot)} = \varepsilon_t + \chi_t \cdot y_{s,j}$$

$$\sigma_{b,ti} = \varepsilon_{b,ti} E_{b,ti} \nu_{b,ti}$$

$$\sigma_{s,tj} = \varepsilon_{s,tj} E_{s,tj} \nu_{s,tj}$$

$$\varepsilon_{b,ti}^{(tot)} = \varepsilon_{b,ti} + \varepsilon_{b,ti}^{(tem)}$$

$$\varepsilon_{s,tj}^{(tot)} = \varepsilon_{s,tj} + \varepsilon_{s,tj}^{(tem)}$$

Разрешающая система уравнений для определения напряжённо-деформированного состояния неравномерно нагретого железобетонного элемента

- Разрешающая система уравнений:

- В более компактном виде:

где

$\{F\}$ – вектор внешних сил;

$[D]$ – матрица жёсткости элемента;

$\{u\}$ – вектор обобщённых деформаций элемента:

ε_t – линейная деформация,

χ_t – угловая деформация;

$\{B\}$ – вектор температурных усилий.

- Осевая B_t и изгибная D_t жёсткости элемента определяются как отношение действующего усилия к соответствующим силовым деформациям:

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_t \\ \chi_t \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} B_{1t} \\ B_{2t} \end{Bmatrix}$$

$$\{F\} = [D] \cdot \{u\} - \{B\}$$

$$D_{11} = \sum_i E_{b,ti} v_{b,ti} A_{b,i} + \sum_j E_s v_{s,tj} A_{s,j};$$

$$D_{12} = D_{21} = \sum_i E_{b,ti} v_{b,ti} A_{b,i} y_{b,i} + \sum_j E_s v_{s,tj} A_{s,j} y_{s,j};$$

$$D_{22} = \sum_i E_{b,ti} v_{b,ti} A_{b,i} y_{b,i}^2 + \sum_j E_s v_{s,tj} A_{s,j} y_{s,j}^2;$$

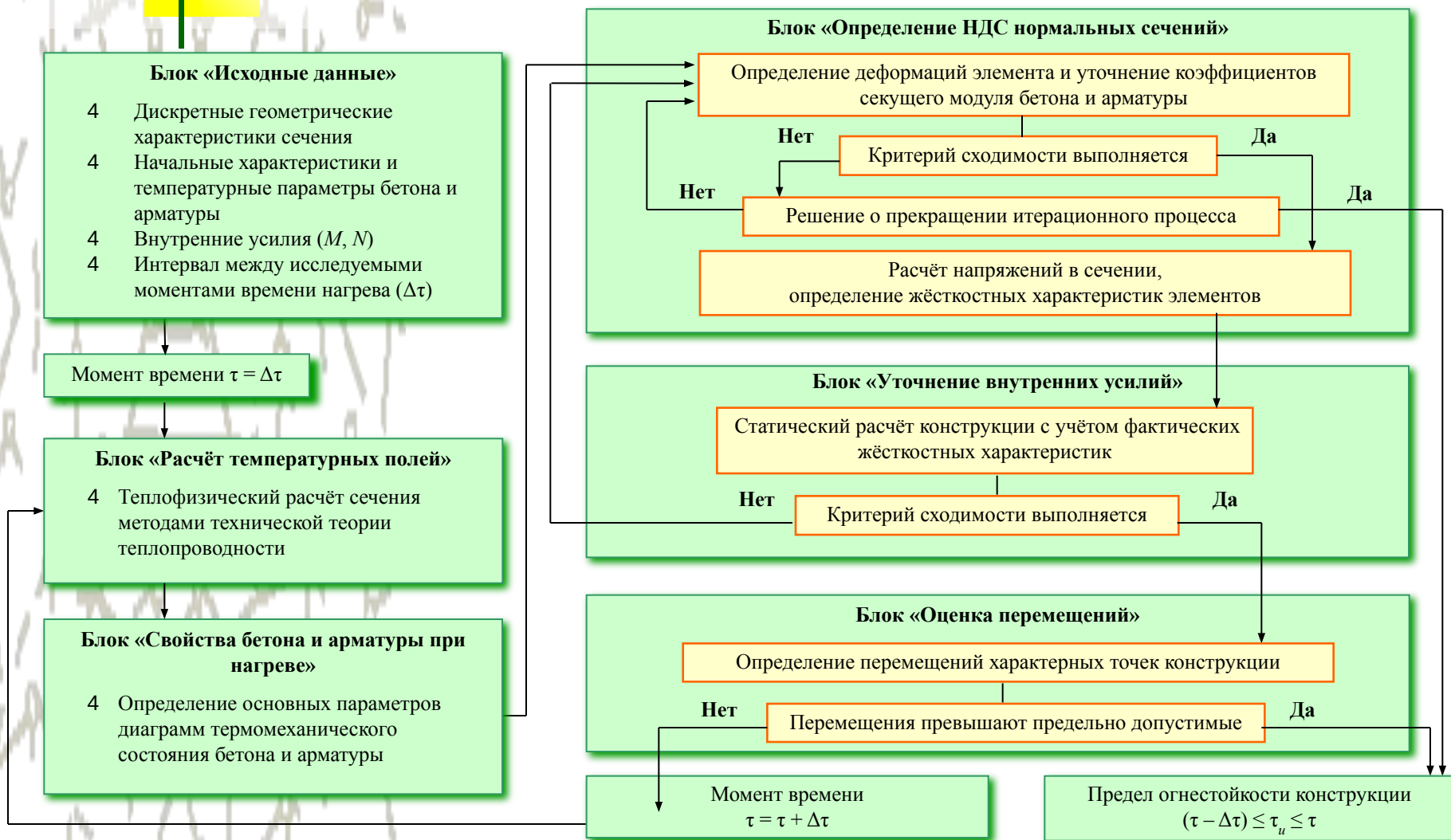
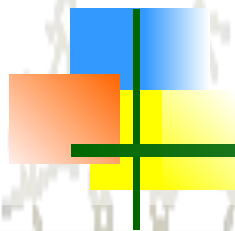
$$B_{1t} = \sum_i E_{b,ti} v_{b,ti} A_{b,i} \varepsilon_{b,ti}^{(tem)} + \sum_j E_s v_{s,tj} A_{s,j} \varepsilon_{s,tj}^{(tem)};$$

$$B_{2t} = \sum_i E_{b,ti} v_{b,ti} A_{b,i} y_{b,i} \varepsilon_{b,ti}^{(tem)} + \sum_j E_s v_{s,tj} A_{s,j} y_{s,j} \varepsilon_{s,tj}^{(tem)}.$$

$$D_t = \frac{M}{\chi_{t,f}}; \quad B_t = \frac{N}{\varepsilon_{t,f}}$$

Алгоритм расчётной оценки огнестойкости железобетонных конструкций

3



Огнестойкость металлических конструкций

Предел огнестойкости несущих металлических конструкций зависит от величины теплозащиты и от приведённой толщины металла $\delta_{пр} = A/U$.

Характеристика конструкций	Размеры, см	Предел огнестойкости, мин
Стальные балки и колонны без огнезащиты с приведённой толщиной металла t_{red}	$t_{red} = 0,5$	R9
	$t_{red} = 1,5$	R18
	$t_{red} = 3,0$	R27
Стальные балки перекрытий при огнезащите по сетке слоем бетона толщиной a	$a = 1$	R45
	$a = 2$	R90
	$a = 3$	R150

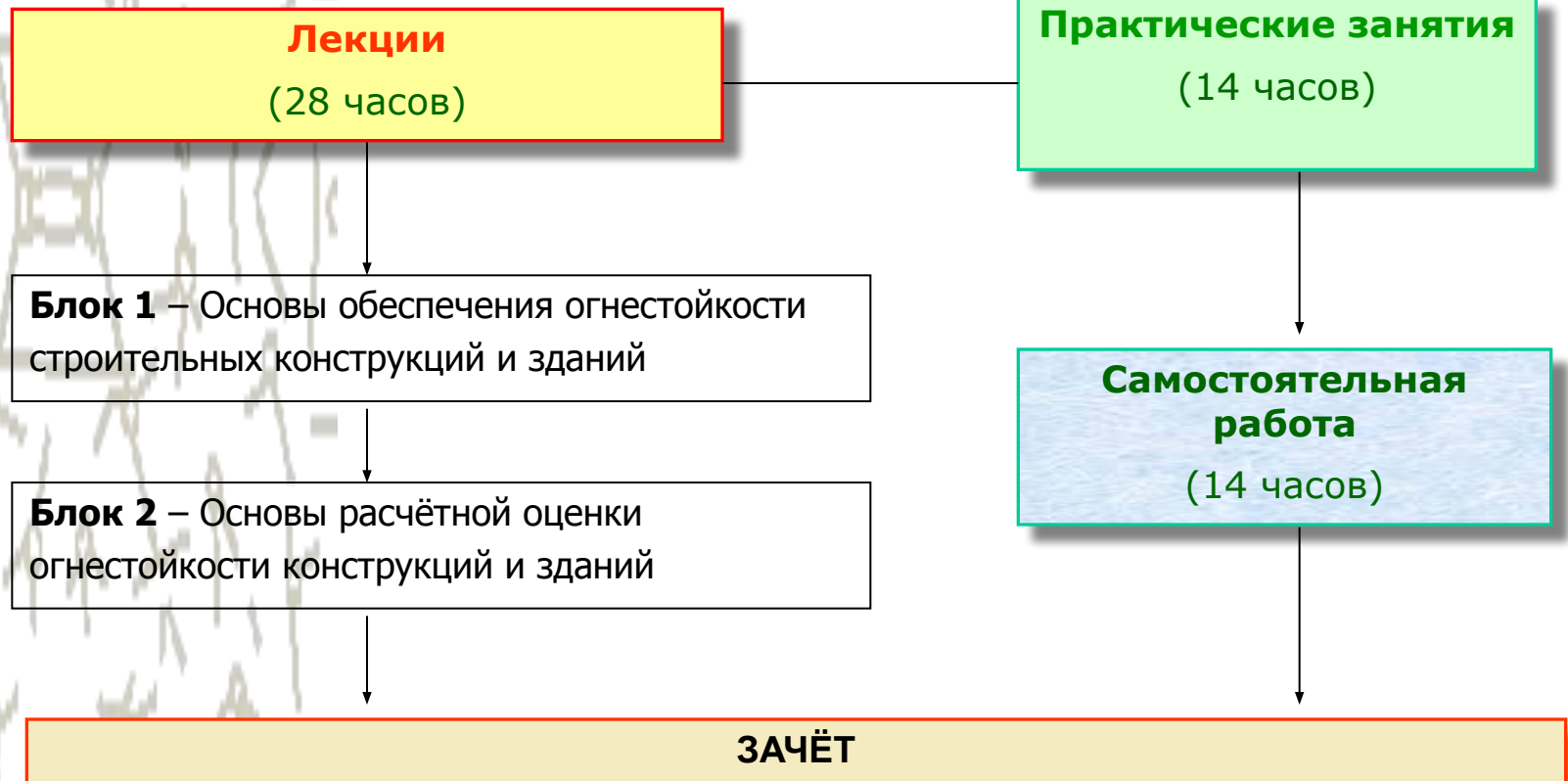
Известково-цементная штукатурка толщ. 15 мм

Гипсовая штукатурка толщ. 10 мм

Вермикулитовая штукатурка и минеральное волокно толщ. 10 мм

Эквивалентны 10 мм
защитного слоя бетона

Структура курса «Огнестойкость строительных конструкций»



Тематическое содержание лекционного курса: Блок 1 – Основы обеспечения огнестойкости строительных конструкций и зданий

- Понятие о пожарной опасности и пожарной безопасности зданий
- Последствия воздействия пожаров на здания
- Температурные режимы пожаров
- Понятие об огнестойкости строительных конструкций и зданий
- Огнестойкость строительных конструкций как базовый элемент противопожарной защиты строительных объектов
- Технические, экономические и социально-психологические аспекты проблемы обеспечения огнестойкости строительных конструкций
- Экспериментальная и расчётная оценка огнестойкости конструкций
- Факторы, определяющие поведение строительных конструкций при пожаре
- Экспериментальные данные об огнестойкости железобетонных, каменных, металлических и деревянных конструкций
- Влияние совместной работы конструкций в составе несущей системы здания на их огнестойкость

Тематическое содержание лекционного курса: Блок 2 – Основы расчётной оценки огнестойкости конструкций и зданий

- Теплотехническая и статическая задачи расчёта огнестойкости
- Основы расчёта температурного режима пожара в помещении
- Основы расчёта температурных полей в сечениях конструкций при пожаре
- Влияние высокой температуры на физико-механические свойства бетона, строительной стали и древесины
- Статический и кинетический подходы к оценке влияния высокой температуры прочностные и деформативные свойства материалов
- Основы расчёта огнестойкости железобетонных, металлических и деревянных конструкций
- Расчётная оценка огнестойкости проектируемых зданий
- Особенности расчётной оценки эксплуатируемых и реконструируемых зданий
- Основы расчётной оценки сохранности железобетонных конструкций после пожара

Тематика практических занятий

- Определение требуемой степени огнестойкости здания и требуемых пределов огнестойкости основных несущих конструкций - 2 ч.
- Расчёт температурных полей в сечениях типовых железобетонных конструкций при пожаре (теплотехническая задача). Определение критических температур нагрева арматуры. Расчёт толщины слоя бетона, прогретого до критической температуры - 2 ч.
- Расчётная оценка огнестойкости железобетонных плит и колонн на основе прочностных и деформационных критериев (статическая задача). Метод критических температур, метод приведённого сечения, метод критических деформаций, диаграммный метод – 6 ч.
- Расчёт огнестойкости стальных и деревянных конструкций – 4 ч.

Всего: 14 ч.

Перечень тем для самостоятельной работы

- Оценка огнестойкости строительных конструкций с учётом реального режима воздействия пожара
- Преимущества и перспективы объектно-ориентированной оценки огнестойкости конструкций и зданий
- Причины и закономерности изменения физико-механических свойств материалов при нагреве
- Конструктивные мероприятия, способствующие повышению огнестойкости строительных конструкций
- Прочность и деформативность железобетонных конструкций, повреждённых пожаром
- Методы решения теплотехнической задачи расчёта огнестойкости железобетонных конструкций
- Методы и средства огнезащиты металлических конструкций



Рекомендуемая литература

- **СНИП 21-01-97***. Пожарная безопасность зданий и сооружений. Нормы проектирования / Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2001.
- **ГОСТ 30247-94**. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. – Взамен СТ СЭВ 1000-78; Введ. 01.01.96.
- **МДС 21.2-2000**. Методические рекомендации по расчёту огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций. Второе издание. – М.: ГУП НИИЖБ, 2000. – 92 с.
- **Фёдоров В.С.** Основы обеспечения пожарной безопасности зданий. – М.: Изд-во АСВ, 2004. – 176 с.
- **Ройтман В.М.** Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. – М.: Асс. «Пожарная безопасность и наука», 2001. – 382 с.
- Огнестойкость строительных конструкций / И.Л. Мосалков, Г.Ф. Плюснина, А.Ю. Фролов – М.: Спецтехника, 2001.– 496с.
- **Яковлев А.И.** Расчёт огнестойкости строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1988. – 143 с.
- **Милованов А.Ф.** Стойкость железобетонных конструкций при пожаре. – М.: Стройиздат, 1998. – 304 с.



Вопросы ?



О работе диссертационных советов

О работе диссертационных советов

- Все действующие диссертационные советы работают до 15 ноября 2007 г.
- Новая сеть диссертационных советов призвана сократить их количество.
- Предпочтение отдаётся объединённым советам.

Основные ошибки и замечания по аттестационным делам, направляемым в ВАК:

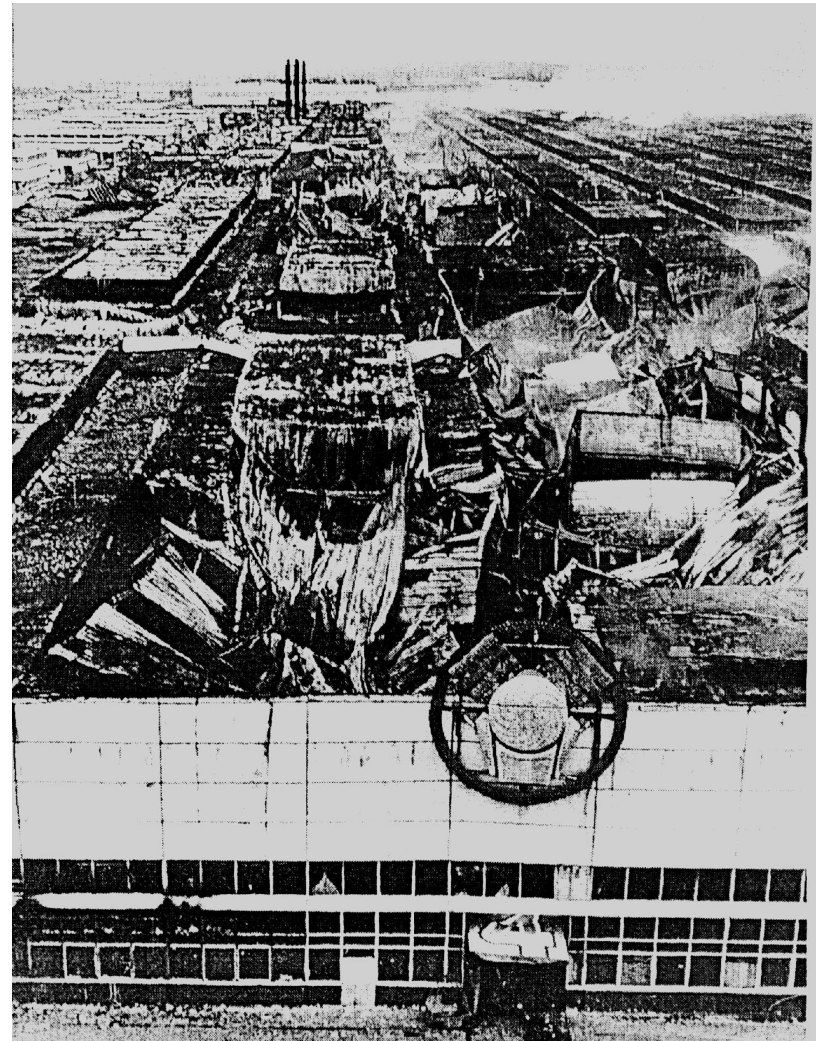
- Содержание работы, научная новизна не соответствуют заявленной специальности;
- Заключение диссертационных советов не соответствует требованиям Положения ВАК по присуждению учёной степени доктора наук;
- Отсутствие или недостаточность публикаций в изданиях, рекомендованных в Перечне ВАК;
- Небрежность оформления документов: несоответствие в комплектах; в документах по-разному указываются место работы, должность, наличие и количество научных трудов; разные формулировки в научной новизне.

Пожар на заводе двигателей КАМАЗ (1993 г.)

Пожар возник в результате возгорания на понизительной подстанции, встроенной в корпус здания завода двигателей.

Распространение огня происходило по кабельной трассе, расположенной в межферменном пространстве, и в течение 15-20 минут огнём были охвачены значительные площади покрытия. Пожарную нагрузку создавало горение силовых фидеров, содержащих такие материалы, как резина, битум, масло и пластмассу, а также полимерного утеплителя и битумной мастики кровли, которые расплавляясь, проливались с потолка в цех. Огонь распространялся по полу корпуса и попадал в тоннели подвала, где были расположены ёмкости с отработанным машинным маслом и охлаждающей жидкостью общим объёмом около 2000 м³.

Пожар в надземной части корпуса был ликвидирован в течение 15 часов. Горение машинных масел в подземных тоннелях продолжалось до 19 апреля.



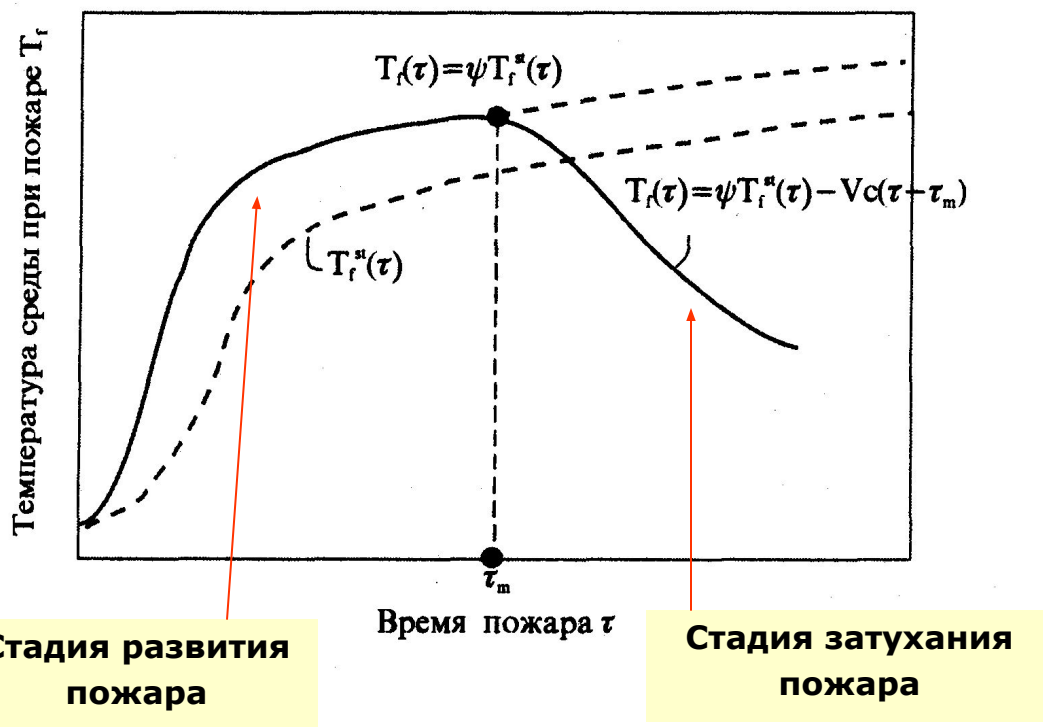
Температурный режим «реального» пожара

τ_m – время начала фазы затухания пожара;

ψ – коэффициент условий пожара;

$$\psi = \frac{T_f(\tau)}{T_f^{st}(\tau)}$$

V_c – скорость снижения температуры среды в фазе затухания реального пожара.



Температурный режим «реального» пожара может быть получен преобразованием «стандартного» пожара с помощью параметров τ_m , ψ , V_c .

Построение изотермических диаграмм деформирования бетона при нагреве под нагрузкой

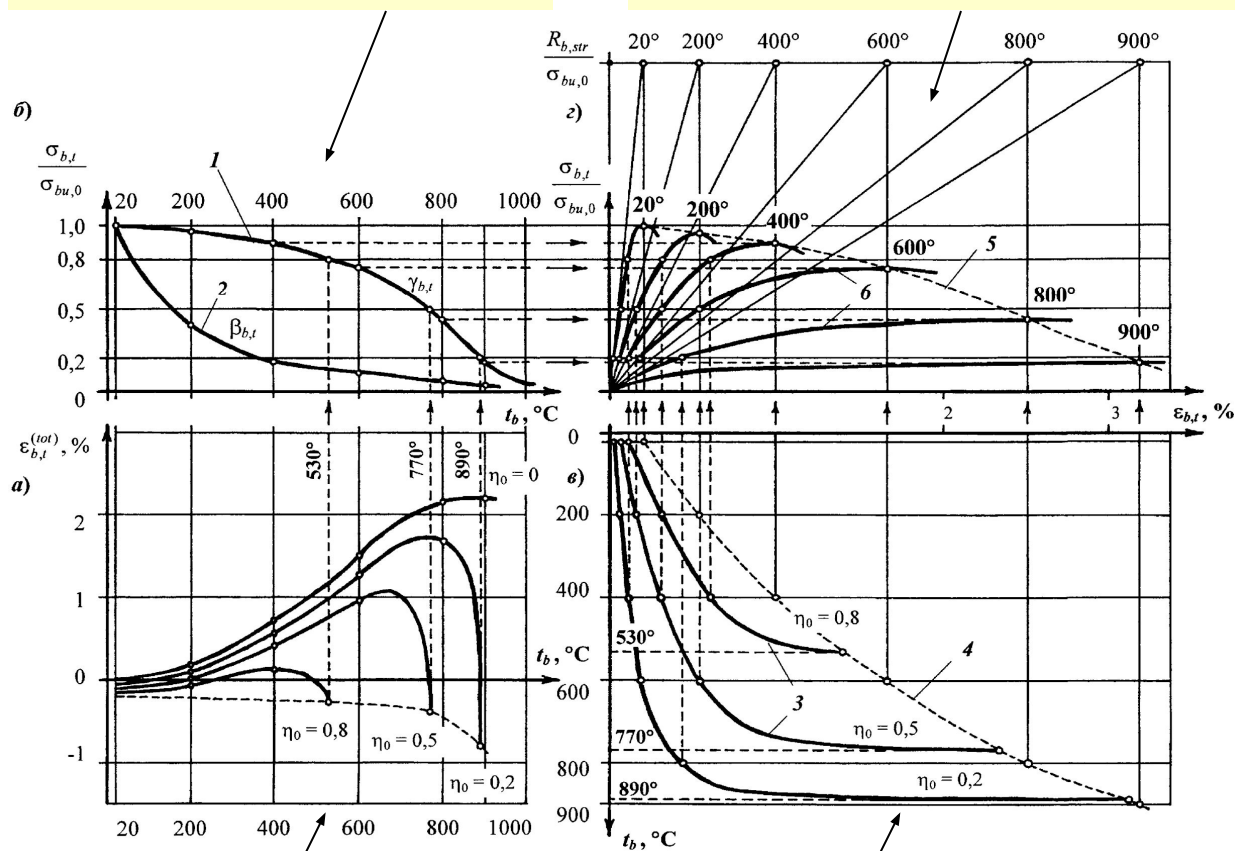
6



Кривые снижения прочности и начального модуля деформаций бетона

Изотермические диаграммы деформирования при нагреве под нагрузкой

- 1 – Кривая снижения прочности бетона
- 2 – Кривая снижения начального модуля деформаций
- 3 – Кривые развития силовых деформаций
- 4 – Кривая предельных силовых деформаций
- 5 – Кривая максимально-граничного состояния
- 6 – Изотермические диаграммы деформирования



Бетон тяжёлый на гранитном заполнителе
(опытные данные ВНИИПО)

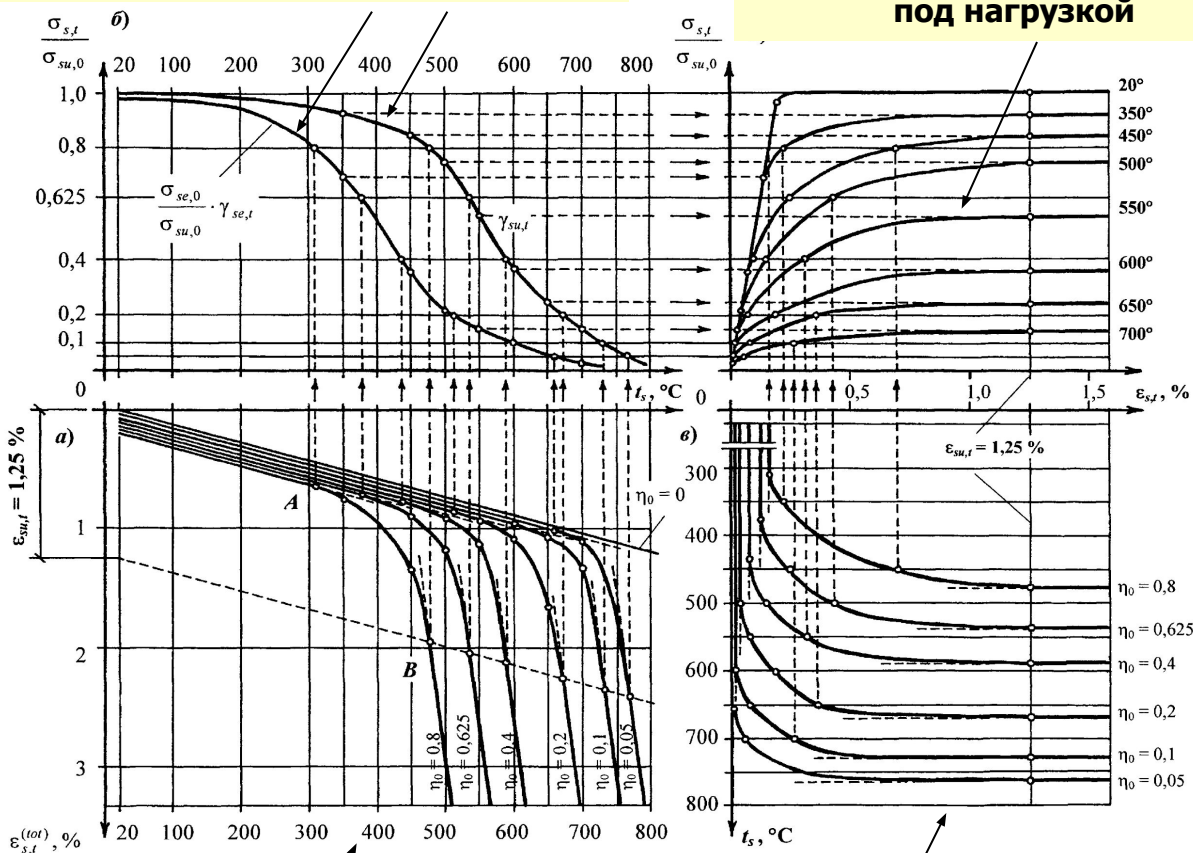
Полные деформации

Силовые деформации

Построение нелинейных изотермических диаграмм деформирования арматуры при нагреве под нагрузкой

Температурные зависимости предела упругости и предела текучести

Изотермические диаграммы деформирования при нагреве под нагрузкой



Арматура класса А400

(А-III)

(опытные данные ВНИИПО)

Полные деформации

Силовые деформации

Температурные зависимости основных механических характеристик арматуры

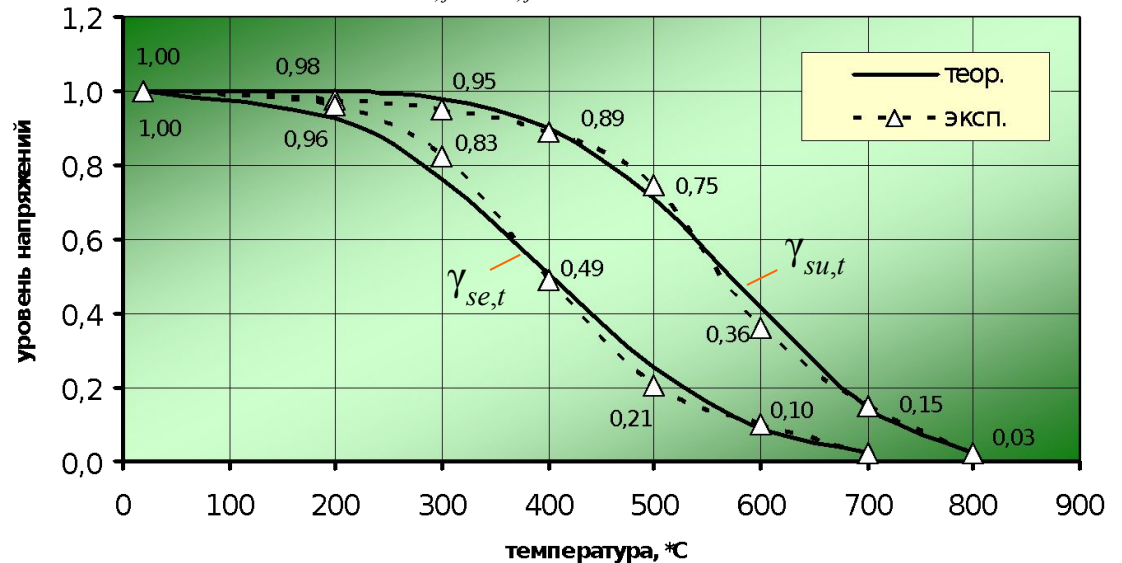
- Температурные зависимости коэффициентов снижения предела упругости $\gamma_{se,tj}$ и предела текучести $\gamma_{su,tj}$ арматуры при нагреве:

$$\gamma_{su,tj} = \exp \left[-\omega_u \cdot \left(\frac{t_{s,j} - t_0}{1000} \right)^c \right]$$

$$\gamma_{se,tj} = \exp \left[-\omega_e \cdot \left(\frac{t_{s,j} - t_0}{1000} \right)^d \right]$$

где $t_{s,j}$ – температура нагрева арматуры;
 ω_u, ω_e, c, d – опытные параметры;
 1000 – размерный коэффициент.

Аналитическая аппроксимация температурных зависимостей параметров $\gamma_{su,tj}$ и $\gamma_{se,tj}$ арматуры класса А400 (А-III)



Основные температурные параметры арматуры класса А400 (А-III)

Температурные параметры	Характеристики изменения предела текучести	c	5
		ω_u	13,25
	Характеристики изменения предела упругости	d	3
		ω_e	12,42
	Деформации начала стадии текучести	$\varepsilon_{su,t} \%$	1,25
Коэффициент температурного расширения	$\alpha_{s,t} 1/^\circ\text{C}$	$15 \cdot 10^{-6}$	

Аналитическое описание диаграмм деформирования арматуры при нагреве

- Напряжения предела текучести $\sigma_{su,tj}$ и предела упругости $\sigma_{se,tj}$ арматуры для данной температуры нагрева:

где $\sigma_{su,0}$, $\sigma_{se,0}$ – предел текучести и предел упругости арматуры до нагрева.

- Деформации $\epsilon_{se,tj}$ соответствующие напряжениям предела упругости:
- Деформации $\epsilon_{su,t}$ соответствующие началу стадии текучести арматуры, принимаются не зависящими от температуры нагрева (например, для арматуры класса А-III $\epsilon_{su,t} = 1,25\%$).
- Предельный локальный коэффициент секущего модуля на нелинейном участке диаграммы $\nu_{\Delta su,tj}$:
- Параметр нелинейности деформирования $k_{\Delta s,tj}$:
- Температурные деформации арматуры:

где $\alpha_{s,t}$ – коэффициент температурного расширения

- Уравнение связи напряжений и деформаций арматуры при нагреве:

где $\nu_{s,tj}$ – коэффициент изменения секущего модуля деформаций.

$$\sigma_{su,tj} = \sigma_{su,0} \cdot \gamma_{su,tj}$$

$$\sigma_{se,tj} = \sigma_{se,0} \cdot \gamma_{se,tj}$$

$$\epsilon_{se,tj} = \sigma_{se,0} / E_s$$

$$\nu_{\Delta su,tj} = \frac{\sigma_{su,tj} - \sigma_{se,tj}}{E_s \cdot (\epsilon_{su,t} - \epsilon_{se,tj})}$$

$$k_{\Delta s,tj} = -\ln(\nu_{\Delta su,tj})$$

$$\epsilon_{s,tj}^{(tem)} = \alpha_{s,t} \cdot (t_{s,j} - t_0)$$

$$\sigma_{s,tj} = \epsilon_{s,tj} \cdot E_s \cdot \nu_{s,tj}$$

Диаграмма термомеханического состояния арматуры

- Выражение для коэффициента $\nu_{s,tj}$ устанавливается различным на каждом из трёх участков изотермической диаграммы:

- В стадии линейно-упругой работы ($\epsilon_{s,tj} \leq \epsilon_{se,tj}$) принимается $\nu_{s,tj} = 1$, тогда $\sigma_{s,tj} = \epsilon_{s,tj} \cdot E_s$.

- В стадии текучести ($\epsilon_{s,tj} \geq \epsilon_{su,t}$) принимается

$$\nu_{s,tj} = \frac{\sigma_{su,tj}}{E_s \epsilon_{s,tj}} \quad \text{тогда } \sigma_{s,tj} = \sigma_{su,tj}$$

(неограниченный горизонтальный участок).

- В стадии нелинейной работы ($\epsilon_{se,tj} < \epsilon_{s,tj} < \epsilon_{su,t}$):

$$\nu_{s,tj} = \frac{\epsilon_{se,tj}}{\epsilon_{s,tj}} \cdot (1 - \nu_{\Delta s,tj}) + \nu_{\Delta s,tj}$$

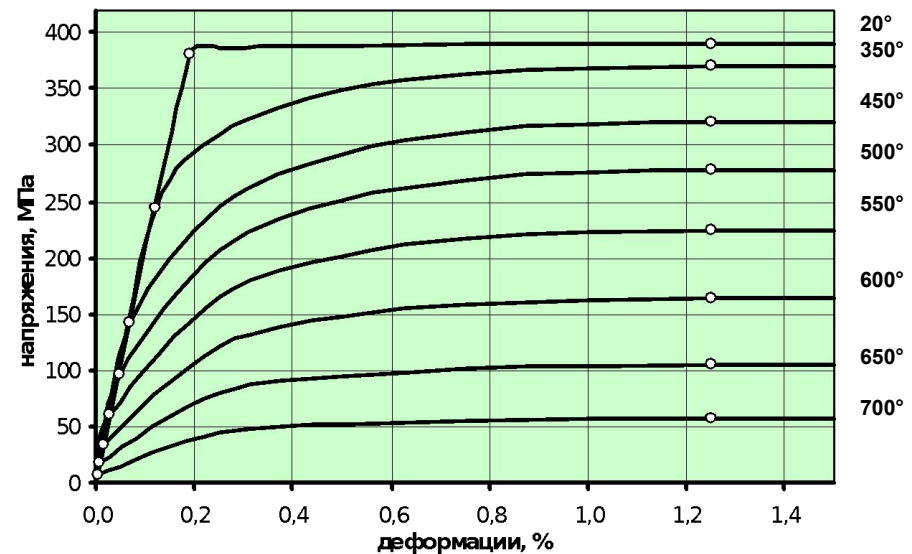
$$\nu_{\Delta s,tj} = \exp \left[-k_{\Delta s,tj} \cdot (\eta_{\Delta \epsilon,tj})^{1/k_{\Delta s,tj}} \right]$$

$$\eta_{\Delta \epsilon,tj} = \frac{\epsilon_{s,tj} - \epsilon_{se,tj}}{\epsilon_{su,t} - \epsilon_{se,tj}}$$

где $\eta_{\Delta \epsilon,tj}$ – уровень приращения деформаций арматуры по отношению к деформациям предела упругости;

$\nu_{\Delta s,tj}$ – локальный коэффициент секущего модуля на нелинейном участке.

Диаграммы деформирования арматуры при различных температурах нагрева, построенные по предлагаемой методике
арматура класса А400 (А-III)



- Разработанная методика позволяет единообразно описывать связь напряжений и деформаций арматуры любых классов как при нагреве, так и при нормальной температуре