



# 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.)

2

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

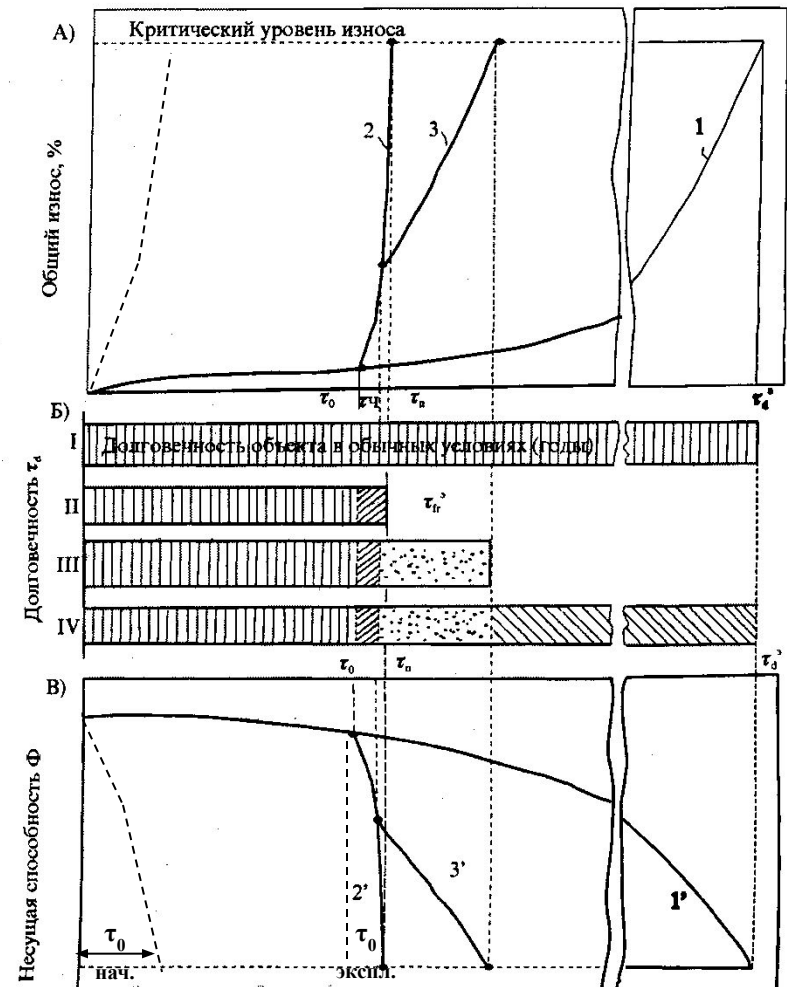
**Огнестойкость** – способность конструкции при пожаре сохранять несущие и (или) ограждающие функции при пожаре.

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.



5

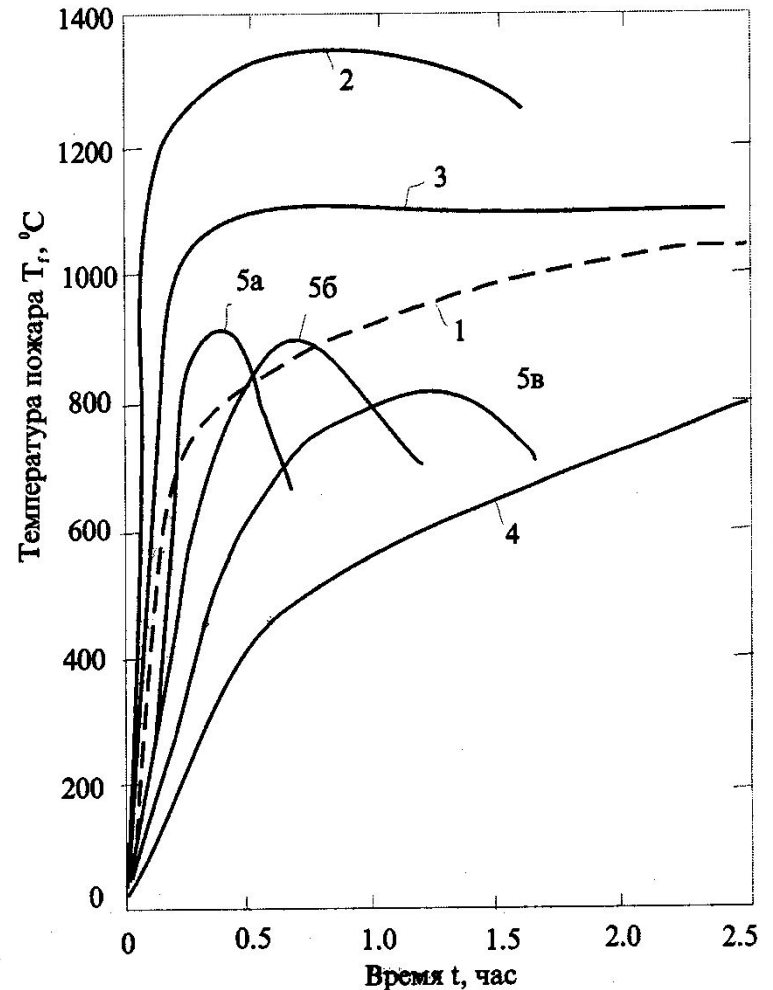
# Температурные режимы пожаров

- 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 м<sup>2</sup>; (5б) – 1,5 м<sup>2</sup>; (5в) – 1,0 м<sup>2</sup>.

## Стандартный температурный режим теплового воздействия на конструкцию

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

$T$  – температура, °С;  $t$  – время, мин.



# «Жёсткое» и «гибкое» противопожарное нормирование

6

## «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.

7

# Температурные режимы пожаров

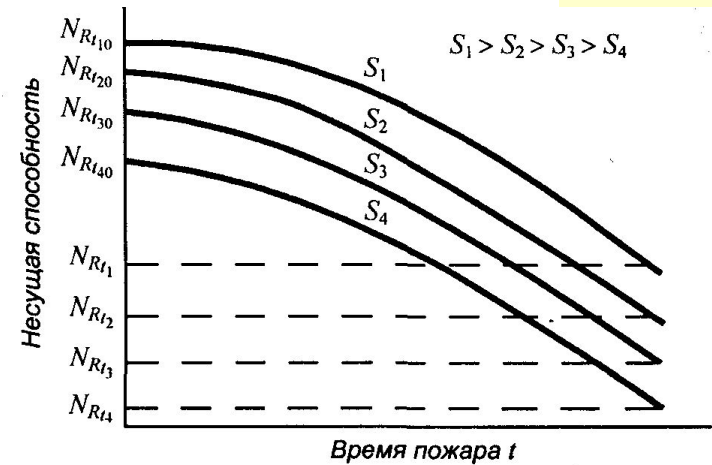
## Определение эквивалентной продолжительности пожара по потере несущей способности конструкции

$S_i$  – сечения конструкций с заданным процентом армирования

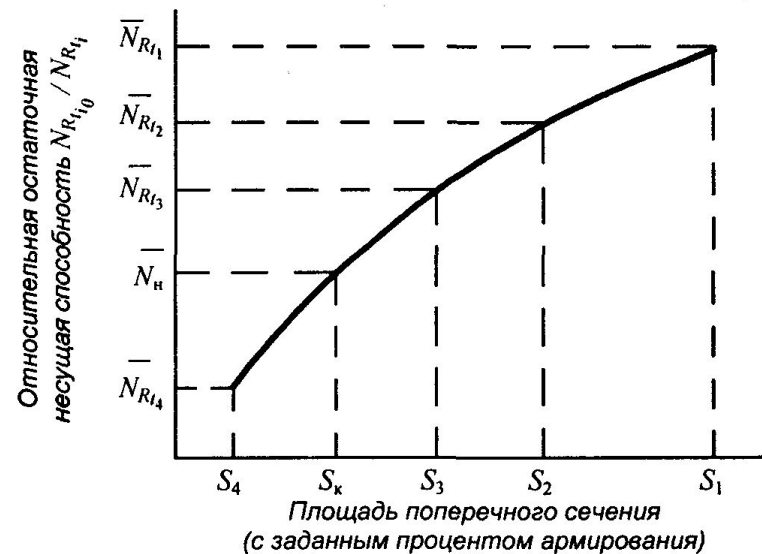
$N_H$  – нормативная нагрузка;

$N_{Rt0}$  – начальное значение несущей способности;

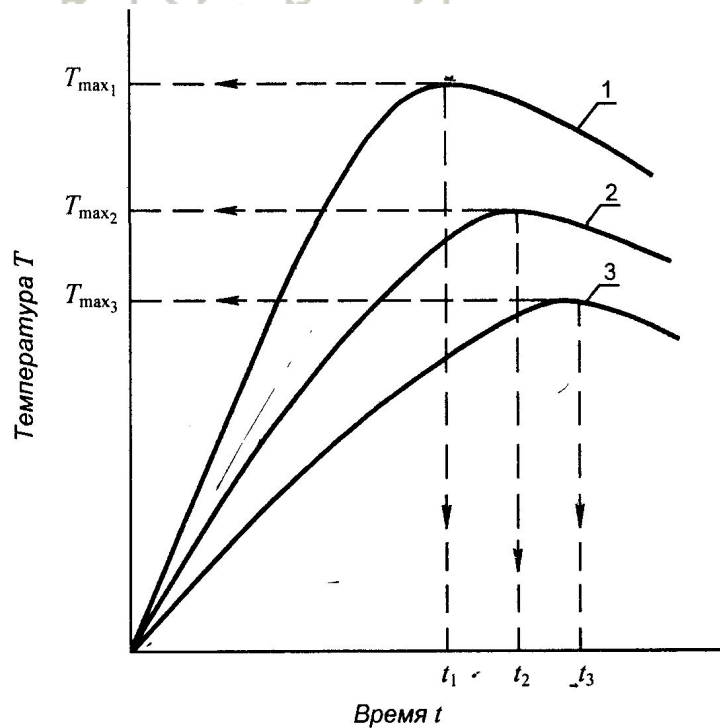
$N_{Rti}$  – несущая способность при тепловом воздействии.



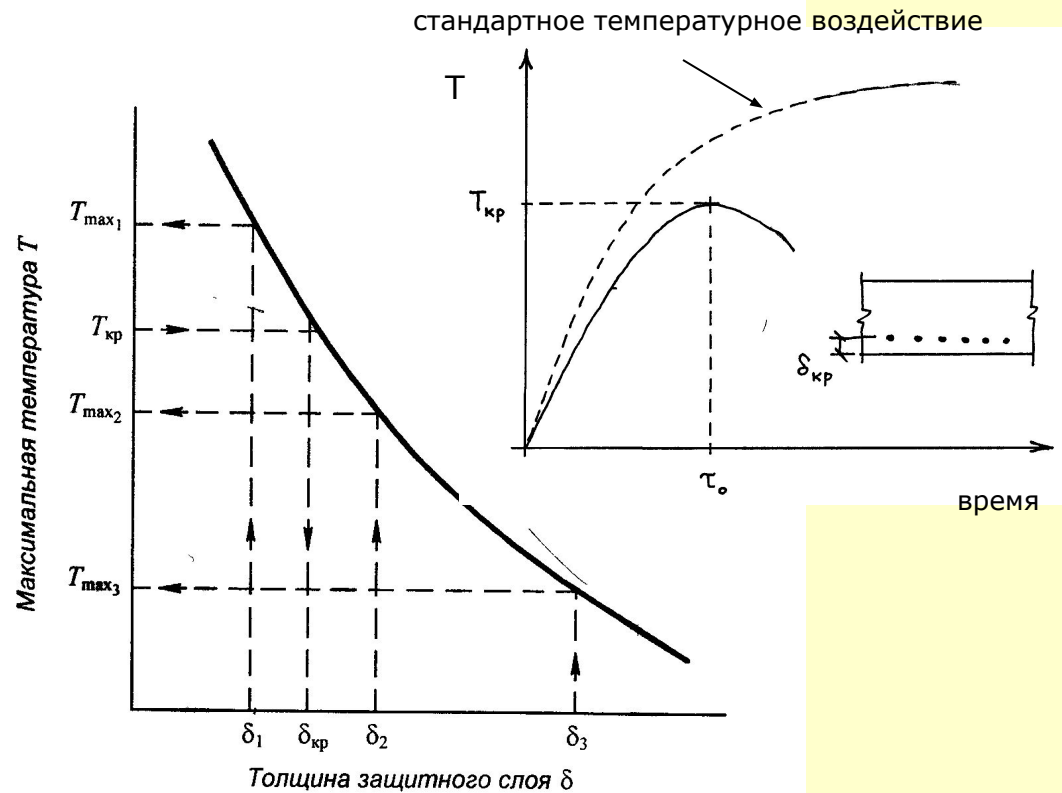
6







1, 2, 3 – кривые прогрева защитных слоёв, соответственно толщиной  $\delta_1; \delta_2; \delta_3$ ;  $t$  – время прогрева слоёв до максимальных температур  $T_{\max}$



## 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.

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						

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.

## **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

13

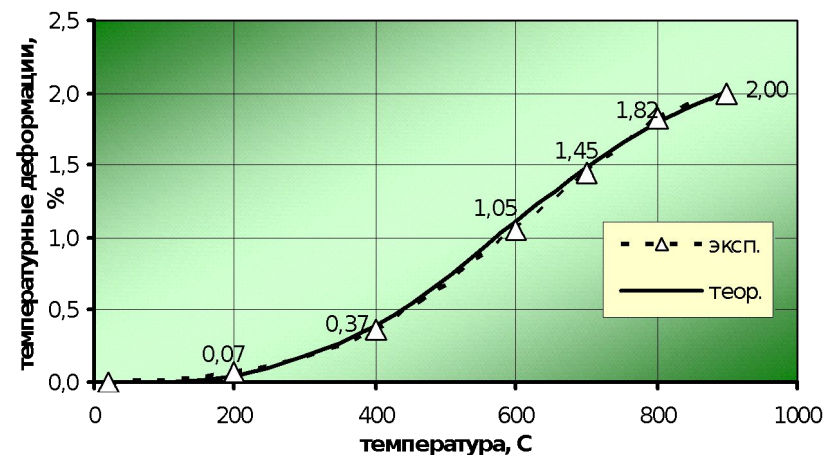
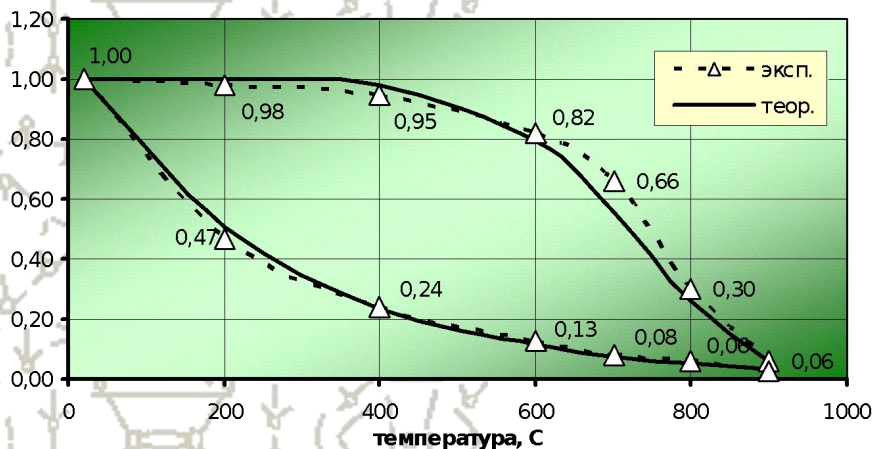
- Коэффициент снижения прочности бетона при нагреве:
- Коэффициент снижения начального модуля деформаций бетона при нагреве:
  - где  $t_{b,i}$  – температура нагрева бетона;  $t_0$  – начальная температура ( $t_0 = 20^\circ\text{C}$ );  $\gamma, \beta, m, n$  – опытные параметры; 1000 – размерный коэффициент.
- Температурные деформации бетона:
  - где  $\alpha, p, \varepsilon_\alpha$  – опытные параметры.

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

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

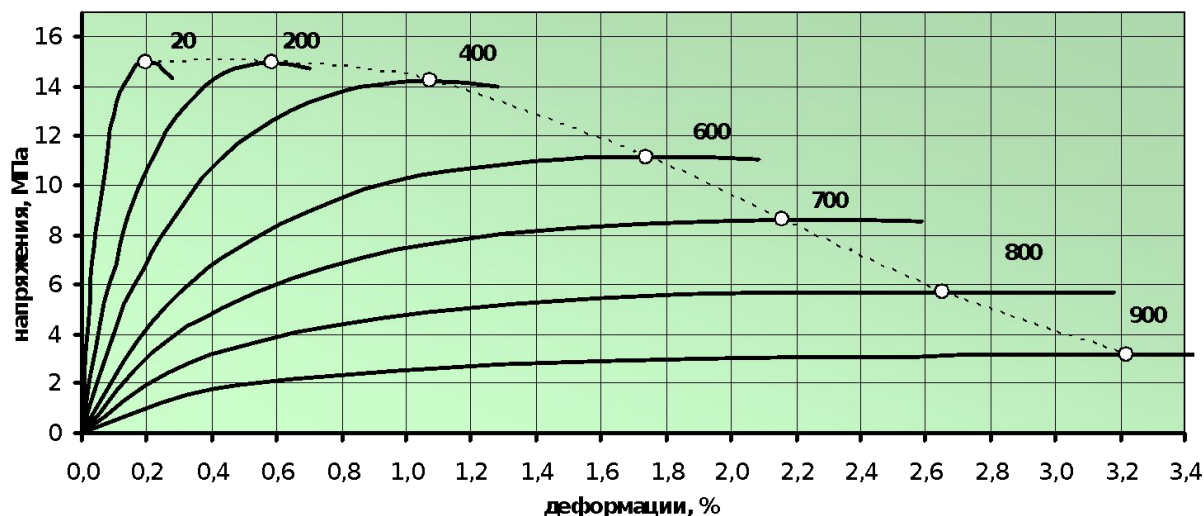
$$\varepsilon_{b,ti}^{(tem)} = \varepsilon_\alpha \cdot \left( 1 - \exp \left[ -\alpha \cdot \left( \frac{t_{b,i} - t_0}{1000} \right)^p \right] \right)$$

Тяжёлый бетон на известняковом заполнителе



# 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:
- Максимальный уровень деформаций:

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

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

При однородном напряжённом состоянии:

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

При неоднородном напряжённом состоянии:

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

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

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

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

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

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



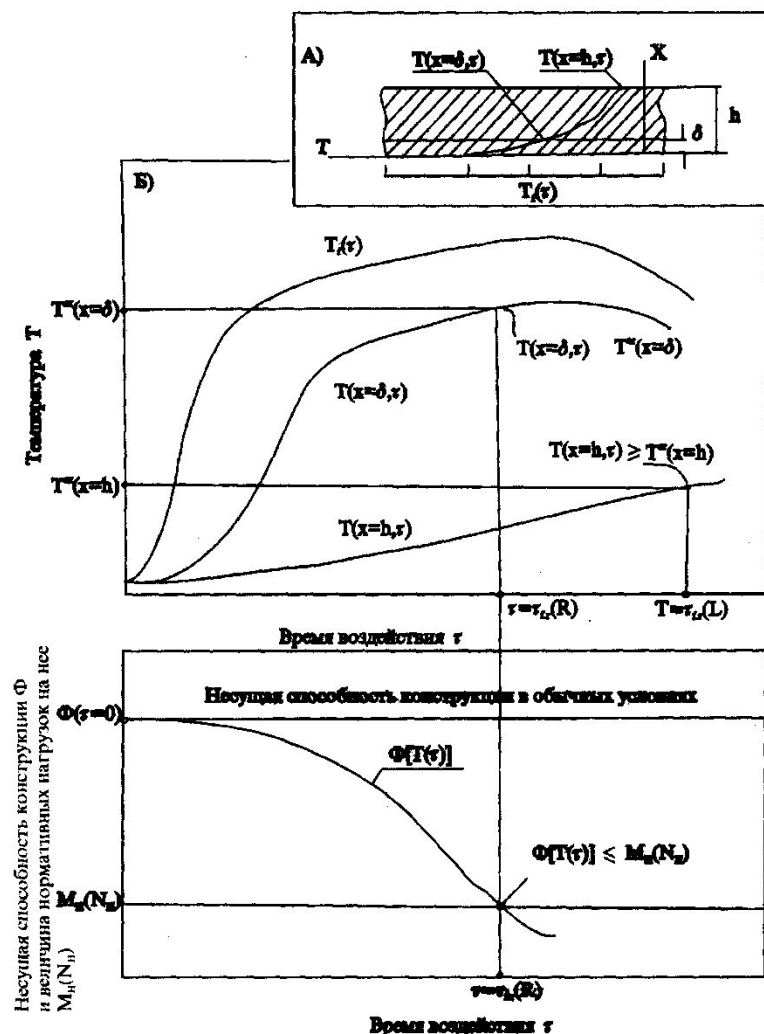
Предел огнестойкости изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных конструкций по несущей способности определяется нагревом рабочей растянутой арматуры до критической температуры.

**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.



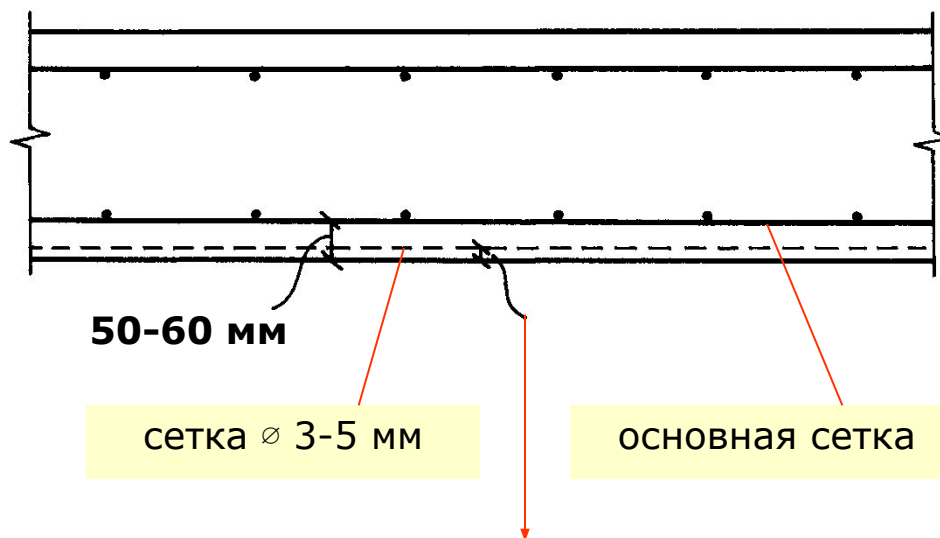
# Влияние размеров элемента и вида бетона

Характеристика конструкций	Размеры, см		Предел огнестойкости, мин
	из тяжёлого бетона	из лёгкого бетона (1200 кг/м <sup>3</sup> )	
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)



## Поперечный разрез плиты перекрытия



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

**25-40 мм** (противооткольная 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

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.

## Статические

## 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:

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

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

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

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

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

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

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

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

# 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:

$\varepsilon_t$  – линейная деформация,

$\chi_t$  – угловая деформация;

$\{B\}$  – вектор температурных усилий.
- Осевая  $B_t$  и изгибная  $D_t$  жёсткости элемента определяются как отношение действующего усилия к соответствующим силовым деформациям:

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

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

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

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

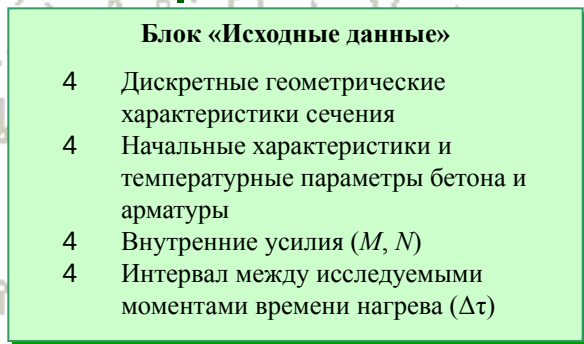
$$D_{22} = \sum_i E_{b,ti} \nu_{b,ti} A_{b,i} y_{b,i}^2 + \sum_j E_s \nu_{s,tj} A_{s,j} y_{s,j}^2;$$

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

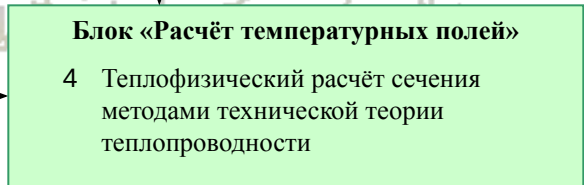
$$B_{2t} = \sum_i E_{b,ti} \nu_{b,ti} A_{b,i} y_{b,i} \varepsilon_{b,ti}^{(tem)} + \sum_j E_s \nu_{s,tj} A_{s,j} y_{s,j} \varepsilon_{s,tj}^{(tem)}.$$

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

# Алгоритм расчётной оценки огнестойкости железобетонных конструкций

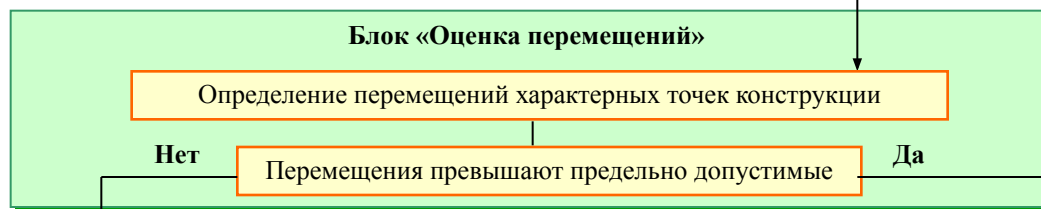
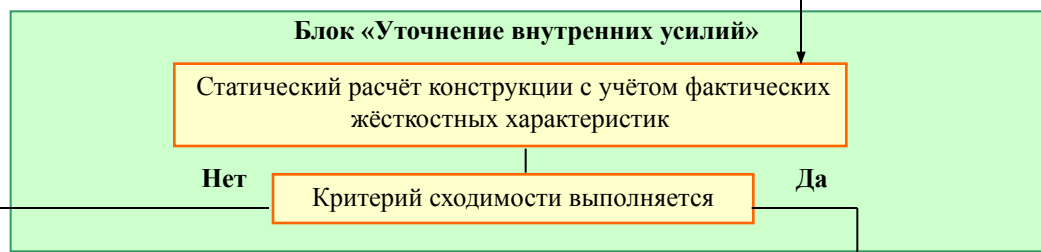
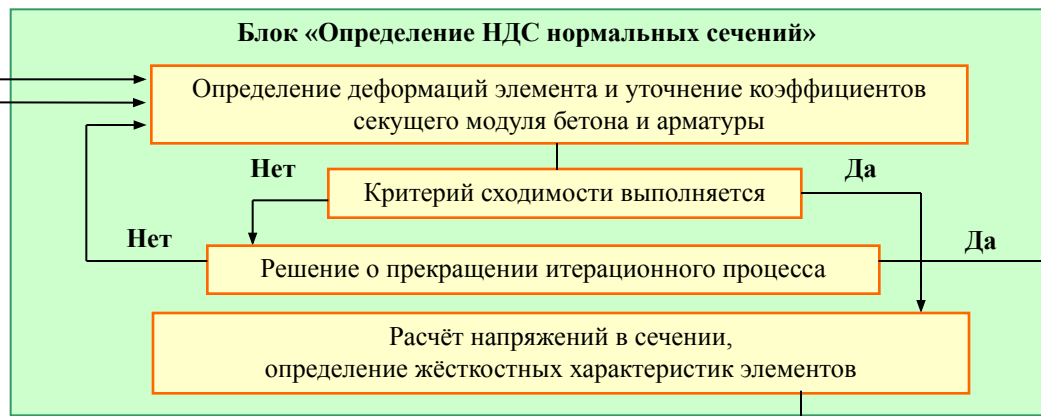


Момент времени  $\tau = \Delta\tau$



**Блок «Свойства бетона и арматуры при нагреве»**

- 4 Определение основных параметров диаграмм термомеханического состояния бетона и арматуры



Момент времени  
 $\tau = \tau + \Delta\tau$

Предел огнестойкости конструкции  
 $(\tau - \Delta\tau) \leq \tau_u \leq \tau$



# 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

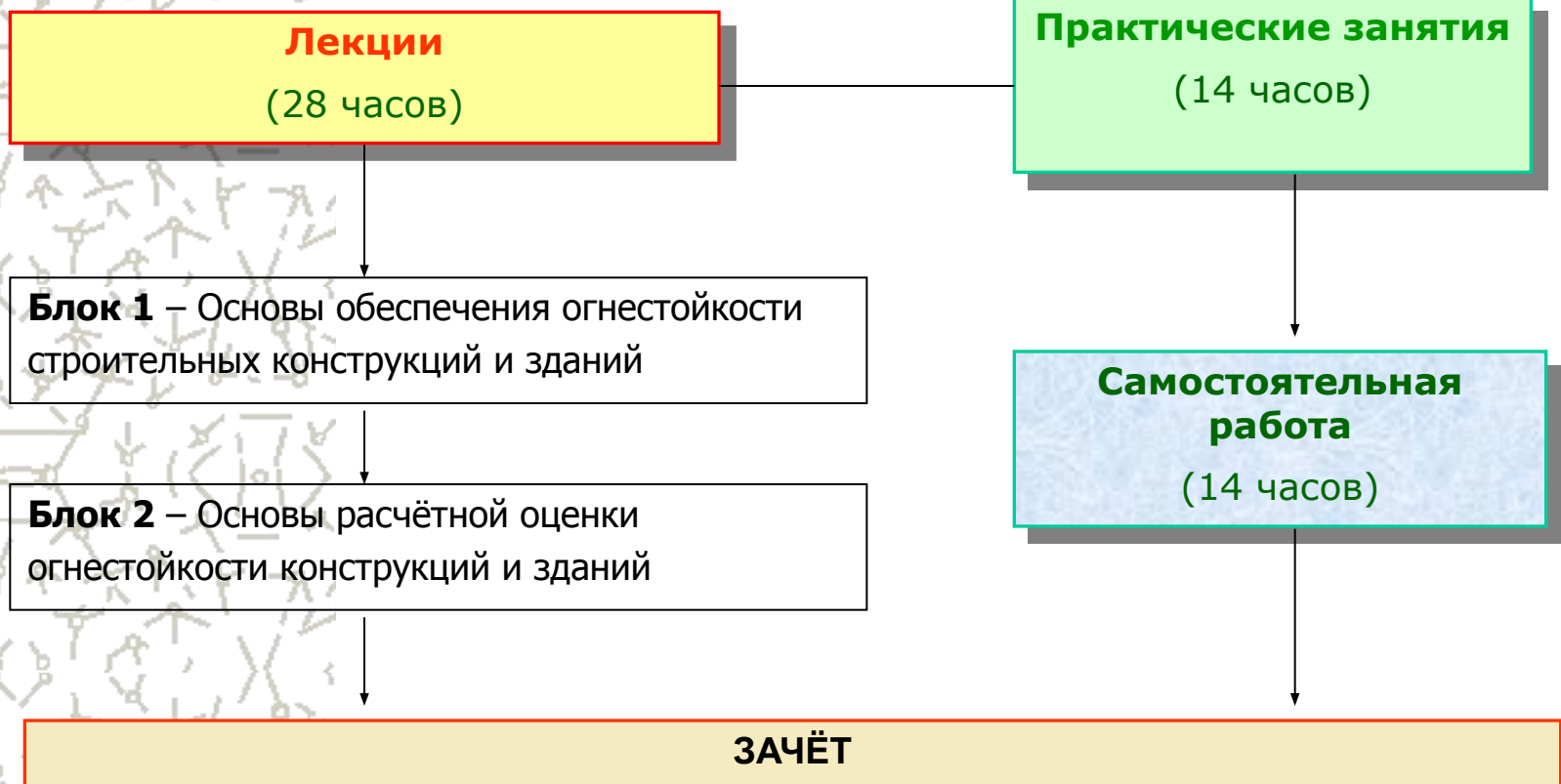
Известково-цементная штукатурка толщ. 15 мм

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

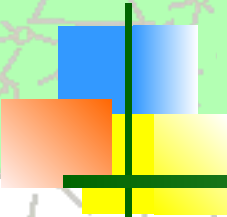
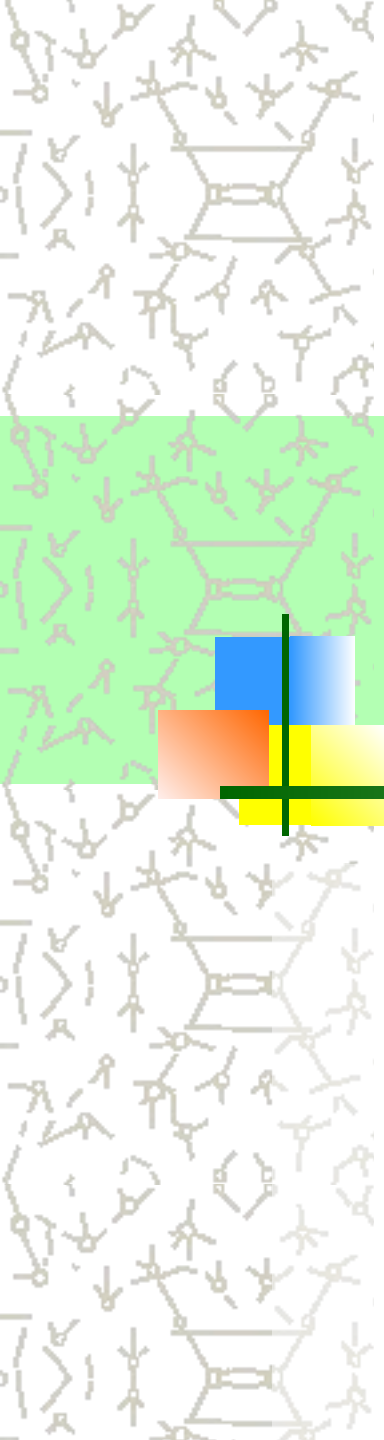
- Теплотехническая и статическая задачи расчёта огнестойкости
- Основы расчёта температурного режима пожара в помещении
- Основы расчёта температурных полей в сечениях конструкций при пожаре
- Влияние высокой температуры на физико-механические свойства бетона, строительной стали и древесины
- Статический 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

- 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.**

- 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

- **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

- 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:**

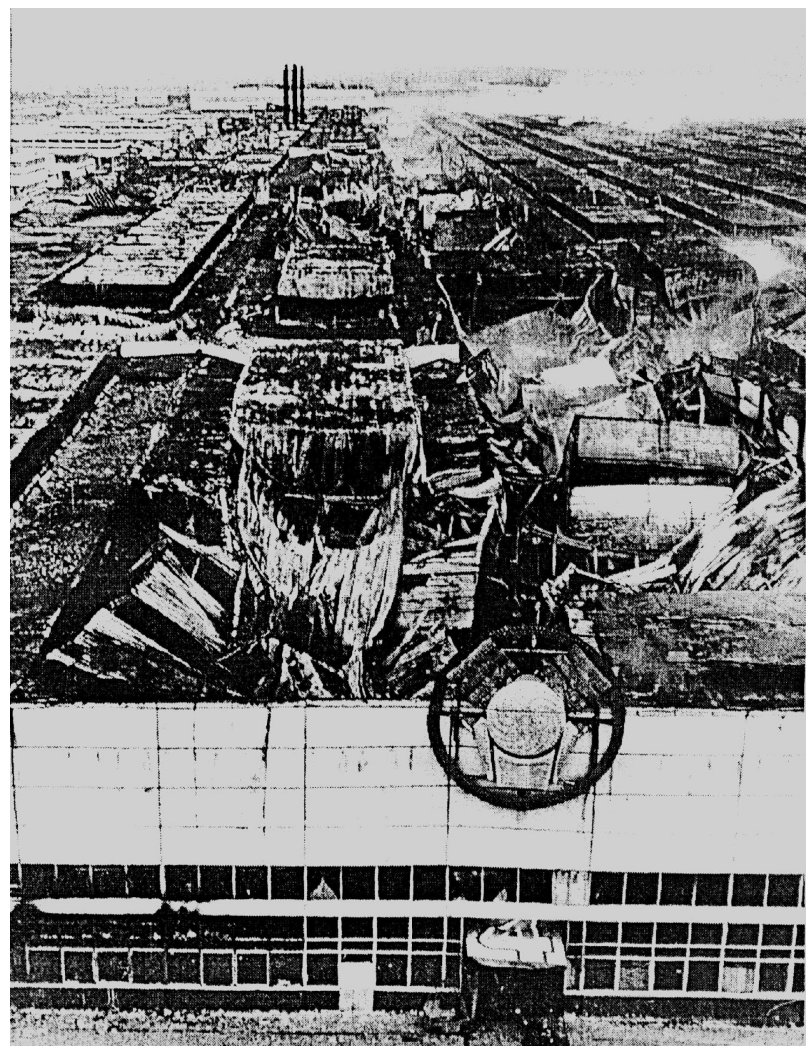
- Содержание работы, научная новизна не соответствуют заявленной специальности;
- Заключение диссертационных советов не соответствует требованиям Положения ВАК по присуждению учёной степени доктора наук;
- Отсутствие или недостаточность публикаций в изданиях, рекомендованных в Перечне ВАК;
- Небрежность 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 м<sup>3</sup>.

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



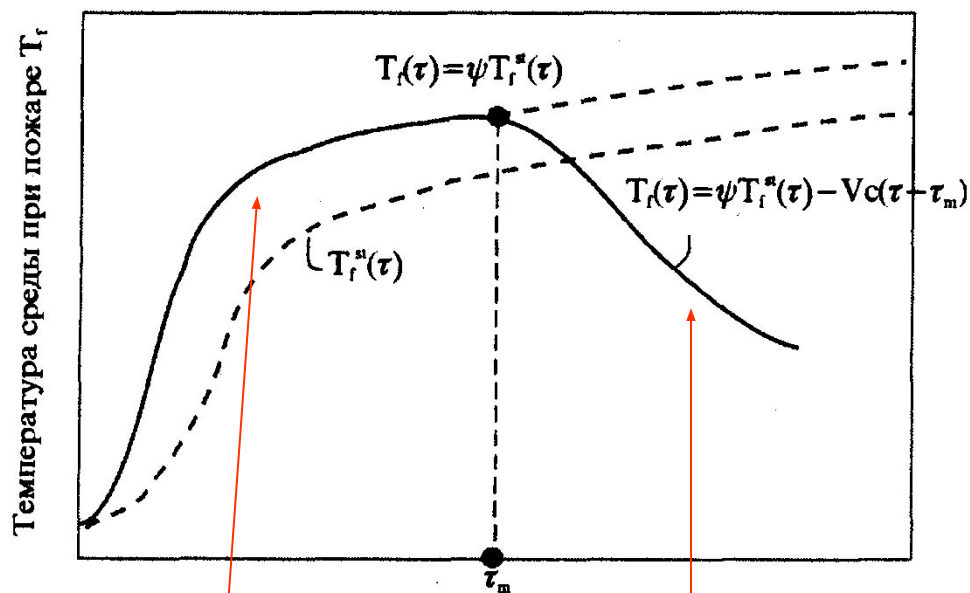
# Температурный режим «реального» пожара

$\tau_m$  – время начала фазы  
затухания пожара;

$\psi$  – коэффициент условий  
пожара;

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

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



Стадия развития  
пожара

Время пожара  $\tau$

Стадия затухания  
пожара

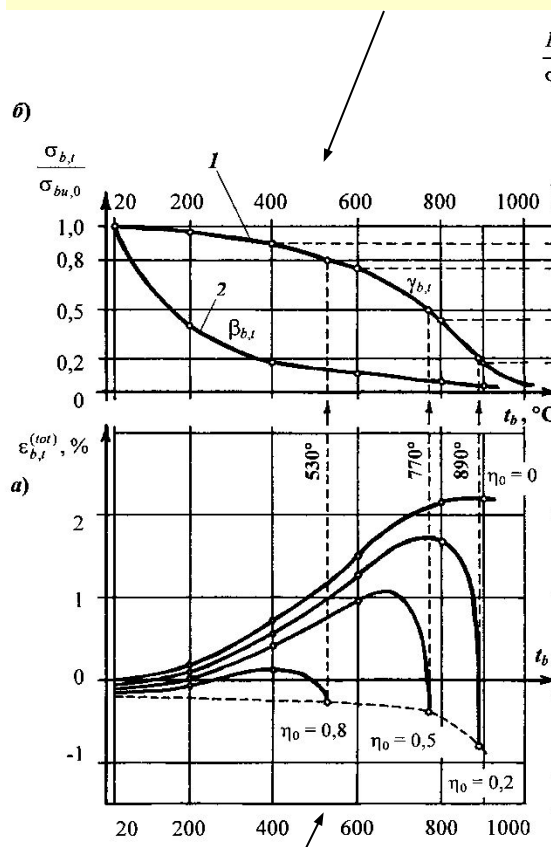
Температурный режим «реального» пожара может быть получен преобразованием «стандартного» пожара с помощью параметров  $\tau_m$ ,  $\psi$ ,  $V_c$ .

# Построение изотермических диаграмм деформирования бетона 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

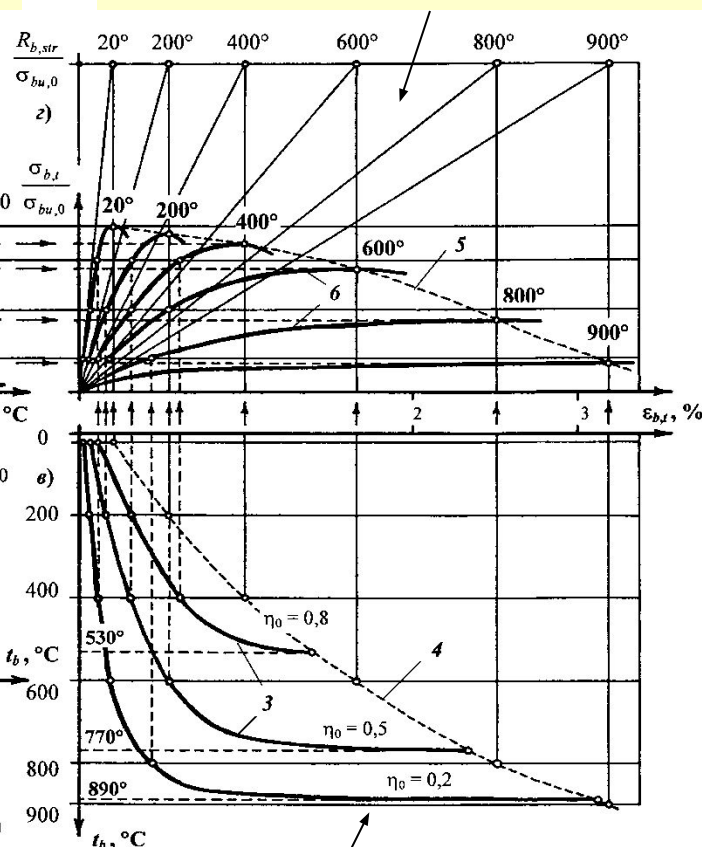
**Бетон тяжёлый на гранитном заполнителе**  
(опытные данные ВНИИПО)

**Кривые снижения прочности и начального модуля деформаций бетона**



**Полные деформации**

**Изотермические диаграммы деформирования при нагреве под нагрузкой**

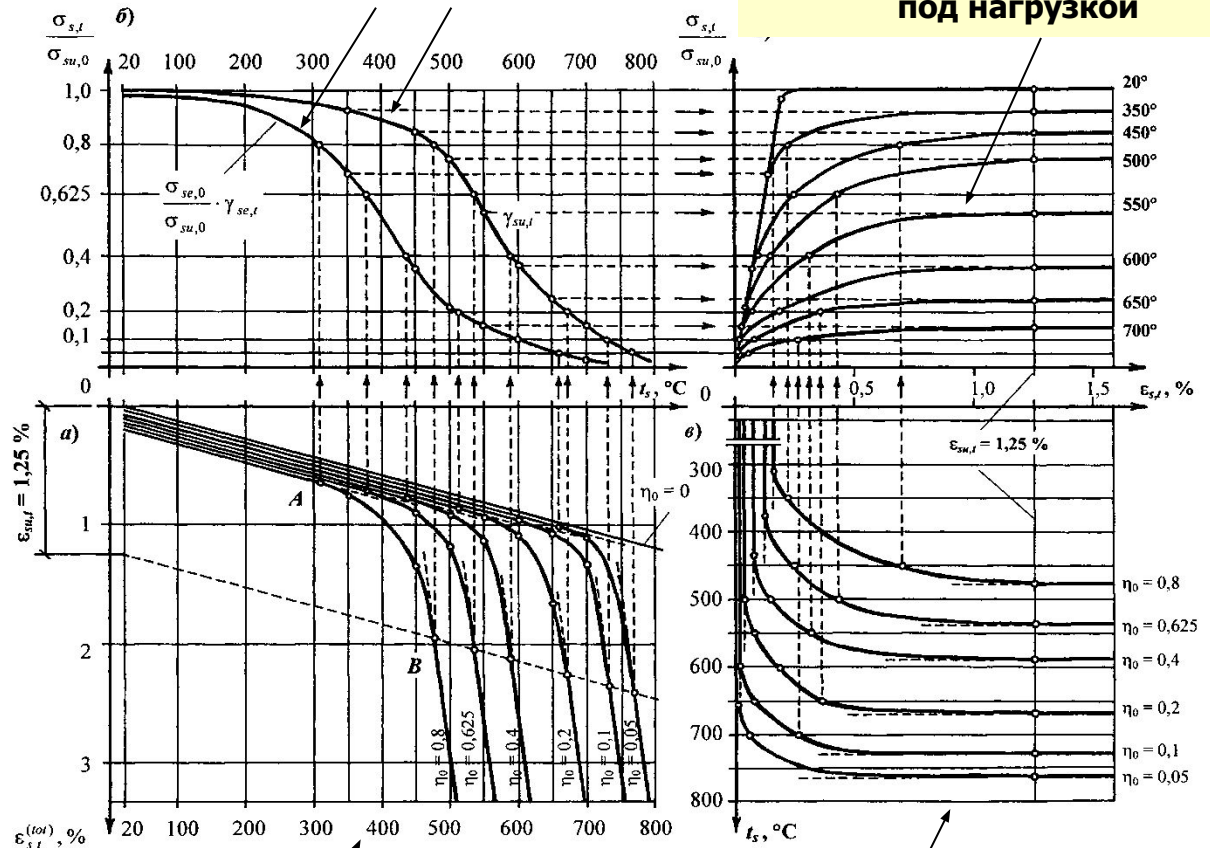


**Силовые деформации**

# 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

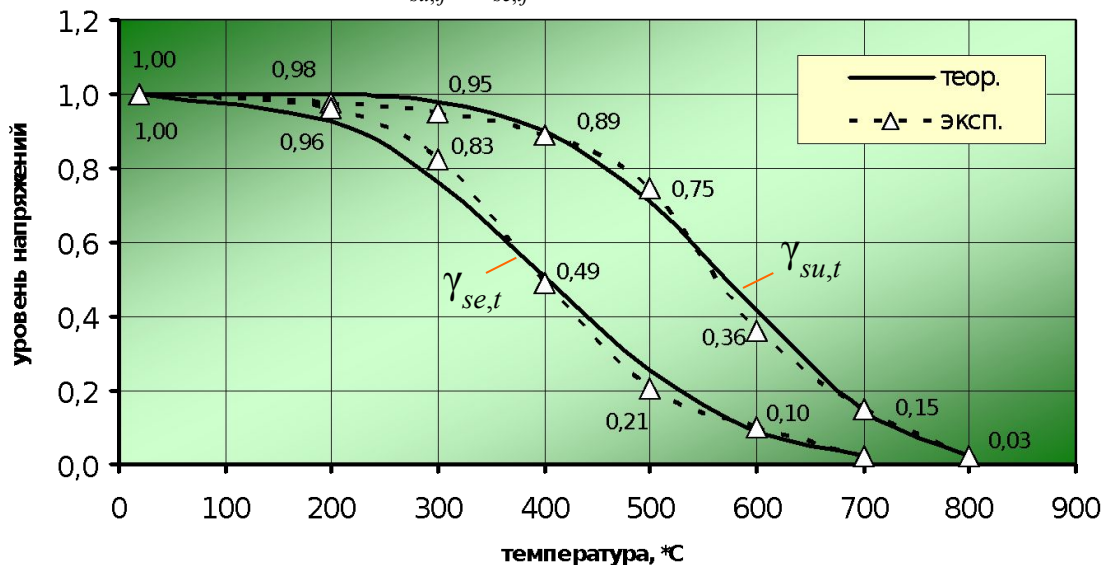
- Температурные зависимости коэффициентов снижения предела упругости  $\gamma_{se,tj}$  и предела текучести  $\gamma_{su,tj}$  арматуры при нагреве:

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

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

где  $t_{s,j}$  – температура нагрева арматуры;  
 $\omega_u, \omega_e, c, d$  – 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
		$\omega_u$	13,25
	Характеристики изменения предела упругости	$d$	3
		$\omega_e$	12,42
	Деформации начала стадии текучести	$\epsilon_{su,t}$ , %	1,25
	Коэффициент температурного расширения	$\alpha_{s,t}$ , 1/°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  $\varepsilon_{se,tj}$  соответствующие напряжениям предела упругости:
- Деформации  $\varepsilon_{su,t}$  соответствующие началу стадии текучести арматуры, принимаются не зависящими от температуры нагрева (например, для арматуры класса А-III  $\varepsilon_{su,t} = 1,25\%$ ).
- 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.

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

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

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

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

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

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

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



# Диаграмма термомеханического состояния арматуры

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

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

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

$$v_{s,tj} = \frac{\sigma_{su,tj}}{E_s \varepsilon_{s,tj}} \quad \text{тогда } \sigma_{s,tj} = \sigma_{su,tj}$$

(неограниченный горизонтальный участок).

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

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

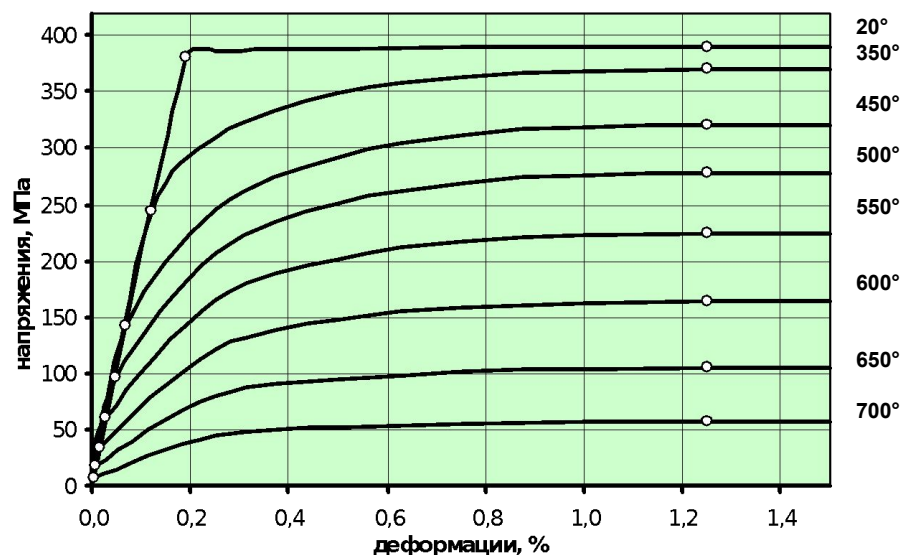
$$v_{\Delta s,tj} = \exp \left[ -k_{\Delta s,tj} \cdot (\eta_{\Delta \varepsilon,tj})^{1/k_{\Delta s,tj}} \right]$$

$$\eta_{\Delta \varepsilon,tj} = \frac{\varepsilon_{s,tj} - \varepsilon_{se,tj}}{\varepsilon_{su,t} - \varepsilon_{se,tj}}$$

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

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

**Диаграммы деформирования арматуры при различных температурах нагрева, построенные по предлагаемой методике**  
арматура класса A400 (A-III)



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