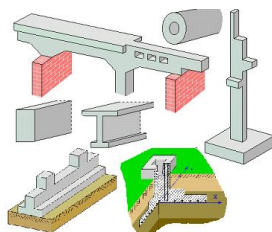




Пакет программ расчётов элементов
строительных конструкций по
огнестойкости
Статика-2025



Описание программ

Copyright© ООО ТЕХСОФТ
17630, Россия, Москва, Старокалужское шоссе, 62к1,
Тел. +7 (916) 589 55 28
+7 (495) 960 22 83
+7 (495) 920 90 67
Internet: www.tech-soft.ru
E-mail: support@tech-soft.ru

Оглавление

Оглавление	3
Краткое руководство для пользователя	6
1. Назначение	6
2. Ввод исходных данных	6
3. Расчёт и печать результатов.....	7
4. Создание проектов и управление ими	7
313 – Расчет ж/б балки по огнестойкости	8
1. Расчетная схема и сечение	9
2. Нагрузки	10
3. Материалы	10
4. Расчет по огнестойкости.....	11
4.1 Определение температурного поля	11
4.2 Проверка прочности при действии изгибающего момента	13
4.3 Проверка прочности при действии поперечной силы.....	14
4.4 Нелинейный расчет усилий.....	14
Литература	16
407 – Расчет ж/б колонны по огнестойкости	17
1. Расчетная схема и сечение	18
2. Нагрузки	19
3. Материалы	19
4. Расчет по огнестойкости.....	21
4.1 Определение температурного поля	21
4.2 Расчет усилий	23
4.3 Определение предельных усилий.....	24
4.4 Учет влияния прогиба.....	26
Литература	28
412 – Расчет сталежелезобетонной колонны по огнестойкости	29
1. Расчетная схема и сечение	30
2. Нагрузки	30
3. Материалы	31
4. Расчет по огнестойкости.....	33
4.1 Определение температурного поля	33
4.2 Расчет усилий	35
4.3 Определение предельных усилий.....	36
4.4 Учет влияния прогиба.....	37
Литература	39
446 – Расчет по огнестойкости преднапряженной плиты	40

1. Сечение	41
2. Расчет плиты при нормальной температуре	41
3. Расчет плиты по огнестойкости.....	42
Литература.....	45
450 – Расчет по огнестойкости	46
1. Сечения	47
2. Усилия.....	49
3. Материалы.....	49
4. Расчет по огнестойкости	50
4.1 Определение температурного поля.....	50
4.2 Определение предельных усилий	53
4.3 Учет влияния прогиба	54
Литература.....	57
451 – Расчет по огнестойкости (сталежелезобетонное сечение)	58
1. Сечения	59
2. Усилия.....	59
3. Материалы.....	60
4. Расчет по огнестойкости	61
4.1 Определение температурного поля.....	62
4.2 Определение предельных усилий	64
4.3 Учет влияния прогиба	65
Литература.....	67
452 – Расчёт трубобетонной колонны по огнестойкости	68
1. Расчётная схема и сечение	69
2. Нагрузки	69
3. Материалы.....	70
4. Расчёт по огнестойкости	72
4.1 Определение температурного поля.....	72
4.2 Расчёт усилий.....	74
4.3 Определение предельных усилий	75
4.4 Учёт влияния прогиба при расчёте по недеформированной схеме	76
Литература.....	78
453 – Расчет по огнестойкости плит и стен	79
1. Расчетная схема	80
2. Усилия.....	80
3. Материалы.....	81
4. Расчет по огнестойкости	82
4.1 Определение температурного поля.....	82
4.2 Определение предельных усилий	84
4.3 Условия прочности плиты	84
4.4 Условия прочности стены.....	85

4.5	Учет влияния прогиба.....	86
	Литература	88
454	– Расчет на продавливание при огневом воздействии	89
1.	Расчетная схема и нагрузки.....	90
2.	Расчет на продавливание при нормальной температуре.....	92
3.	Расчет на продавливание при огневом воздействии	93
	Литература	96

Краткое руководство для пользователя

1. Назначение

Пакет программ **СТАТИКА** предназначен для расчётов и проектирования элементов строительных конструкций. В состав пакета вошли следующие программы: **программа ввода, расчётные программы**, программа документирования результатов расчета **Viewer** и программа управления проектами **Менеджер проектов**.

Программа ввода позволяет создавать и рассчитывать позиции проекта. В рамках данного пакета, под позицией понимается набор данных для отдельного расчёта строительного элемента. Каждой позиции соответствует одна расчётная программа.

Программа **Viewer** обеспечивает просмотр документов с результатами расчетов позиций. Она имеет функции просмотра и печати документов, архивирования и пересылки электронной почтой. Предусмотрена возможность преобразования документа в формат **pdf** для просмотра в программах Adobe Acrobat и Adobe Reader (команда **Печать**).

Программа **Менеджер проектов** предназначена для работы с проектами. Она позволяет организовать хранение документов (текстов, чертежей, расчетных позиций) по проектам и обеспечивает управление ими (удаление, копирование, печать, и др.), имеет функции архивирования и работы с электронной почтой.

Для удобства работы, все программы пакета снабжены подробными текстами, подсказками и иллюстрациями.

2. Ввод исходных данных

Для создания новой позиции или открытия существующей позиции используются команды **Создать** или **Открыть** из выпадающего меню **Позиция** программы **Менеджер проектов** при активной вкладке **СТАТИКА**. На экране появляется интерфейс ПК **СТАТИКА**, позволяющий выбрать расчётную программу.

Исходные данные для расчёта задаются в окне **Ввод** ПК **СТАТИКА**. Окно **Ввод** содержит поля для ввода данных. Поля ввода, связанные по смыслу, группируются в вопросы, а вопросы – в разделы. Возможны следующие типы полей ввода:

- поле ввода чисел
- поле ввода текста
- поле со списком (отмечено треугольником, выбор при помощи мыши или клавиш +, -)
- поле с набором переключателей (отмечено знаком X)

При вводе числовых данных, автоматически проверяются условия допустимости, при их нарушении появляется предупреждение.

С целью сокращения объёма ввода, для некоторых полей предусмотрено получение значений из стандартных шаблонов. Значения автоматически появляются в полях ввода при создании позиции. Шаблоны могут создаваться пользователем. Для создания шаблонов, используется команда **Сохранить как...**, доступная в меню **Позиция** ПК **СТАТИКА**. В появляющемся диалоге необходимо выбрать вкладку **Стандартная позиция**

На панели инструментов ПК **СТАТИКА** предусмотрена специальная кнопка, позволяющая создать новую позицию на основе стандартной позиции.

Для позиции можно составить комментарии, выводимые в начале и в конце выходного документа. Ввод комментария осуществляется путём двойного щелчка левой клавишей мыши в полях ввода **Комментарий к позиции** или **Комментарий к расчёту**.

При вводе данных, можно произвольно переходить на любое поле ввода. Для перехода можно использовать мышь или клавиши Enter, Tab и стрелки. Для быстрого перехода следует использовать клавиши PageUp, PageDown, Ctrl+Home, Ctrl+End.

Помимо окна **Ввод**, предусмотрены следующие вспомогательные окна:

- Список позиций
- Каталог вопросов
- Разъяснения вопросов
- Иллюстрации вопросов

Вспомогательными окнами можно управлять с помощью команд из меню **Вид**. В окне **Каталог вопросов** отображается структура проекта с разделами ввода. При помощи этого окна, можно быстро перейти на требуемое поле ввода. В окне **Разъяснения вопросов** отображается описание текущего вопроса (параметры, единицы измерения, области допустимых значений, ссылки на пункты норм и др.). В окне **Иллюстрации вопросов** отображаются поясняющие рисунки к текущему вопросу, при этом выделяется цветом параметр, соответствующий текущему полю ввода. **Список позиций** содержит список всех позиций, содержащихся в проекте.

При вводе некоторых числовых данных, можно использовать команду **Вычисления** из контекстного меню поля ввода для задания арифметического выражения (формулы), по которому вычисляется вводимое значение. Это выражение будет сохранено в расчётной позиции для возможности последующего редактирования. В выходном документе арифметическое выражение не отображается.

3. Расчёт и печать результатов

Сохранение введенных данных осуществляется кнопками **Сохранить** и **Сохранить как...** на верхней панели инструментов ПК СТАТИКА. Расчёт выполняется при помощи команды **Расчет** или **Расчет...** из меню **Позиция** (при использовании команды **Расчет...**, предварительно вызывается диалог **Конфигурация вывода**).

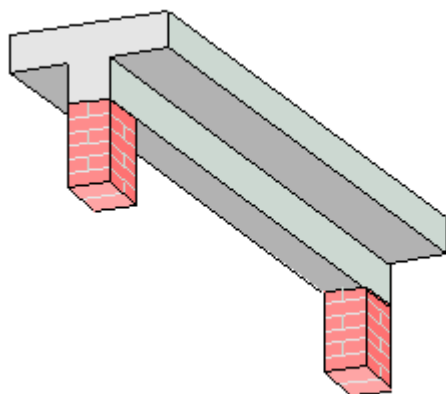
Результаты расчёта выводятся в программу документирования результатов расчета **Viewer** или на принтер. Результаты расчета проекта формируются как единый документ, который может быть напечатан или отправлен по электронной почте. При печати, единый документ будет иметь сквозную нумерацию страниц. Также можно создать любое количество документов, управляя составом документа (например, для отдельного типа позиций – свой документ). ПК СТАТИКА позволяет напечатать документ в компактной форме (2 или 4 страницы документа на одном листе бумаги).

ПК СТАТИКА дает возможность произвести расчет сразу нескольких позиций. Позиции выбираются в программе **Менеджер проектов** в активном окне текущего проекта стандартным способом с помощью мыши и клавиш Ctrl или Shift.

4. Создание проектов и управление ими

Программа **Менеджер проектов** предназначена для работы с проектами, которые представляют собой группы позиций. Проект может быть создан в любой папке системы, за исключением корневого каталога. **Менеджер проектов** имеет функции архивирования и работы с электронной почтой. При установке ПК СТАТИКА, создается группа **Projekte**, содержащая группу **Примеры** и группу **Другие**.

313 – Расчет ж/б балки по огнестойкости



Программа предназначена для расчёта по огнестойкости однопролетной железобетонной балки согласно СП 468.1325800.2019 [1] и СП 63.13330.2018 [2]. Температурное поле в сечении балки при огневом воздействии определяется путем решения задачи нестационарной теплопроводности с учетом зависимости теплофизических характеристик бетона от температуры. Проводятся проверки прочности при действии изгибающего момента и поперечной силы. Проверка прочности при действии изгибающего момента производится на основе диаграмм деформирования сжатого бетона и арматуры с учетом коэффициентов условий работы, зависящих от температуры. Предусмотрен учет продольной силы. В случае статически неопределимой балки, проводится нелинейный расчет усилий, приводящий к перераспределению изгибающего момента.

1. Расчетная схема и сечение

Расчетная схема балки представляет собой стержневой элемент, имеющий шарнирные или абсолютно жесткие закрепления краев. Рассматриваются балки прямоугольного и таврового сечений (рис.1).

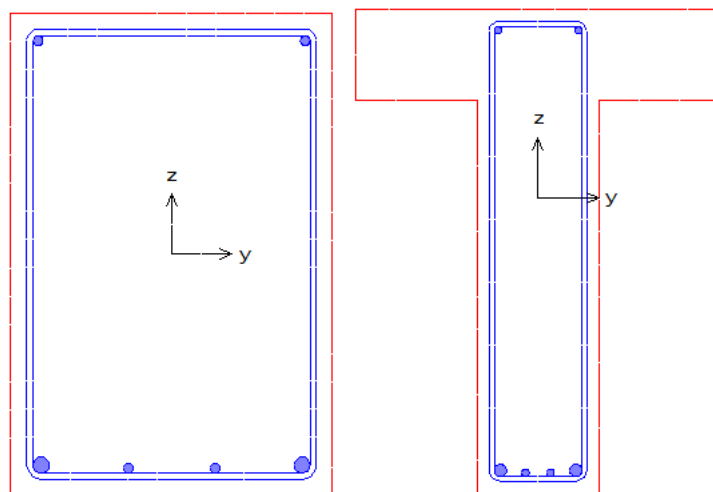


Рис.1. Виды сечений

Продольная арматура располагается у верхней и нижней сторон сечения. Задаются диаметры крайних и промежуточных стержней арматурного слоя, а также - число промежуточных стержней. Отсутствие ввода диаметра крайних стержней воспринимается как отсутствие арматуры. Предусмотрено задание дополнительных рядов стержней. Для каждого ряда стержней задаются координаты начала и конца отрезка, на котором размещаются арматурные стержни. Для удобства ввода рядов стержней применяется система координат (Y, Z) с началом в левой точке нижней стороны сечения. Ось Y направляется вправо по нижней стороне сечения, а ось Z - вверх по левой стороне прямоугольного сечения или по левой стороне ребра таврового сечения. Задаются число стержней в ряду и диаметр стержней. Данный ввод может применяться при двухрядном размещении стержней верхней или нижней арматуры, а также при размещении стержней в свесах полки таврового сечения. Предусмотрен контроль расстояния между арматурными стержнями.

Поперечная арматура вводится путем задания диаметра хомутов, числа ветвей хомутов и шага хомутов по длине балки.

Предусмотрено задание различных значений толщины защитного слоя бетона сверху, снизу и сбоку. Толщина защитного слоя определяется как расстояние от грани балки до поперечной арматуры.

2. Нагрузки

Согласно [1], расчет по огнестойкости проводится для наиболее неблагоприятного сочетания нормативных постоянных и длительных нагрузок.

Возможно задание нагрузки, равномерно распределенной по всей длине балки, а также задание сосредоточенных поперечных сил и/или сосредоточенных моментов. Точка приложения сосредоточенной нагрузки определяется по расстоянию x от левого края балки. Положительные направления нагрузок показаны на рис.2.

Предусмотрено задание продольной силы N . Величина продольной силы принимается положительной при сжатии.

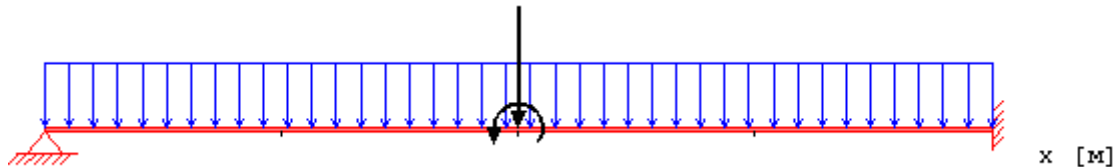


Рис. 2. Положительные направления нагрузок

3. Материалы

Класс бетона и класс арматуры принимаются согласно [2]. Расчет проводится для бетонов до класса В55 включительно. Диаграммы деформирования бетона и арматуры при нормальной температуре приведены на рис. 3, 4. По горизонтальной оси откладывается значение деформации в промилле ($1\text{‰}=0.1\%=0.001$). Отрицательные значения соответствуют деформации сжатия.

Расчетные сопротивления материалов при нагреве определяются по формулам [1]:

$$R_{bnt} = R_{bn} \gamma_{bt}$$

$$R_{snt} = R_{sn} \gamma_{st}$$

Значения коэффициента условий работы бетона γ_{bt} принимаются по таблице 5.1 [1], параметры диаграммы для бетона $\varepsilon_{b1}, \varepsilon_{b2}$ - по таблице 5.5 [1]. Значения коэффициента условий работы арматуры γ_{st} принимаются по таблице 5.6 [1]. Предельная деформация арматуры ε_{s2} принимается равной 25‰ при $20^\circ\text{C} \leq T \leq 200^\circ\text{C}$ и равной 50‰ при $T \geq 500^\circ\text{C}$. При $200^\circ\text{C} < T < 500^\circ\text{C}$ предельная деформация ε_{s2} определяется интерполяцией.

В программе возможен табличный вывод коэффициентов для заданного вида заполнителя в бетоне и класса арматуры.

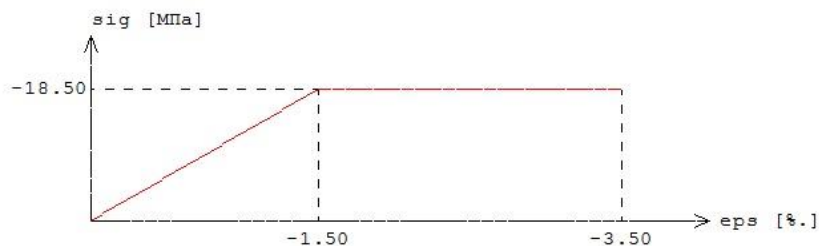


Рис.3. Диаграмма деформирования сжатого бетона В25 при нормальной температуре

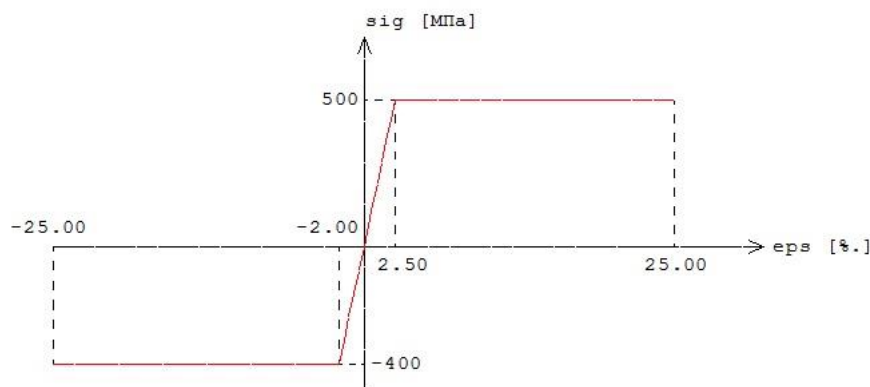


Рис.4. Диаграмма деформирования арматуры А500 при нормальной температуре

4. Расчет по огнестойкости

Огнестойкость элемента характеризуется периодом времени (в минутах) от начала пожара до момента возникновения предельного состояния элемента. Для несущих элементов предельным состоянием по огнестойкости является состояние, при котором происходит потеря несущей способности. Предельное состояние наступает тогда, когда предельные усилия становятся равными расчетным усилиям. В программе строится зависимость коэффициента запаса прочности γ_u от времени. Предел огнестойкости определяется по моменту времени, при котором $\gamma_u = 1$.

4.1 Определение температурного поля

Для определения предела огнестойкости, необходимо рассчитать температурное поле в сечении элемента от огневого воздействия. Температурное поле $T(y,z,t)$ определяется на основе уравнения нестационарной теплопроводности:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = c \rho \frac{\partial T}{\partial t}$$

Здесь λ - коэффициент теплопроводности, c - удельная теплоемкость, ρ - плотность материала. При расчете температуры в сечении элемента не учитывается наличие арматуры.

Коэффициент теплопроводности бетона в [Вт/(м⁰С)] определяется по следующим формулам (см.[1], 6.3):

- для бетона на силикатном заполнителе $\lambda = 1.2 - 0.00035T$;
- для бетона на карбонатном заполнителе $\lambda = 1.14 - 0.00055T$.

Удельная теплоемкость бетона в [Дж/(кг⁰С)] на силикатном или карбонатном заполнителе равна $c = 710 + 0.83T$. В программе предусмотрен учет влажности бетона согласно [4], при котором зависимость удельной теплоемкости от температуры характеризуется пиковым значением при 115⁰С, равным 1470 и 2020 при влажности 1.5% и 3% соответственно.

Огневое воздействие характеризуется зависимостью температуры среды от времени, отсчитываемого от начала пожара. Согласно [3], при стандартном пожаре, принимается следующая зависимость температуры среды от времени:

$$T_0 = 20 + 345 \lg(8t + 1), \text{ где } t - \text{ время в мин.}$$

График зависимости $T_0(t)$ представлен на рис.5.

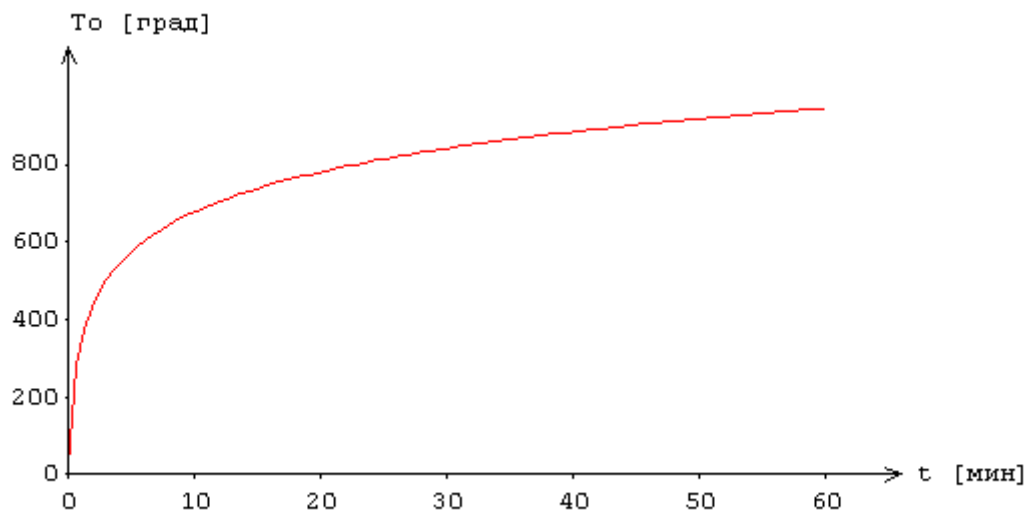


Рис.5. Зависимость температуры среды от времени

В случае прямоугольного сечения, рассматривается трехсторонний нагрев (нагрев всех сторон сечения, кроме верхней). В случае таврового сечения, рассматривается либо трехсторонний нагрев (нагрев сторон ребра и нижних сторон полки), либо односторонний нагрев (нагрев верхней стороны полки).

Температурная задача решается конечноразностным методом. Производная $\frac{\partial T}{\partial t}$ заменяется разностным отношением

$$\frac{T(y, z, t + \Delta t) - T(y, z, t)}{\Delta t}$$

где Δt - шаг по времени. Расчет температурного поля в сечении производится для дискретных моментов времени. Шаг по времени может приниматься равным 3мин, 6мин, 12мин или задаваться другим значением в пределах от 1мин до 30мин. В общем случае, при увеличении шага, уменьшается объем вычислений, однако может снижаться точность результата.

Производные по координатам заменяются разностными отношениями. После определения температуры на конечноразностной сетке температура в произвольной точке сечения определяется интерполяцией.

При вводе исходных данных программы, могут быть заданы управляющие параметры расчета температурного поля: номинальный шаг сетки S и максимальное число точек сетки в одном направлении $N_{\max}$. Если значение S не задано, то принимается $s = 10$ мм. Если значение $N_{\max}$ не задано, то принимается $N_{\max} = 60$. Аналогичные параметры могут быть заданы для управления разбиением сжатой зоны сечения на малые элементы при определении предельных усилий.

Предусмотрен вывод распределения температуры вдоль вертикальной оси сечения (рис.6) и картины изотерм (рис.7).

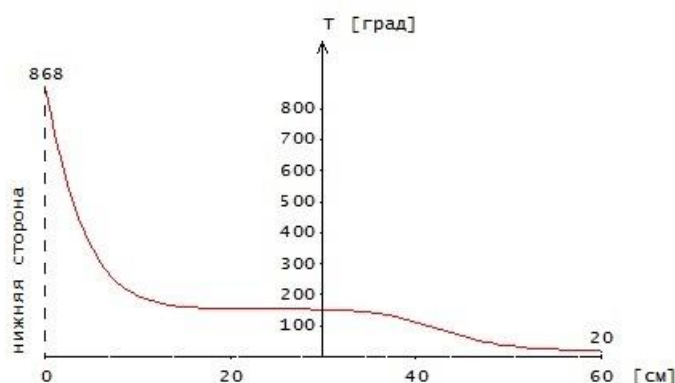


Рис.6. Пример распределения температуры

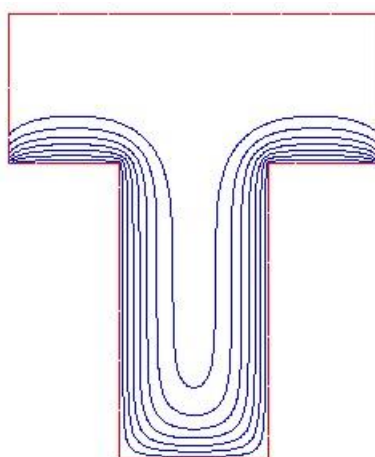


Рис.7. Пример картины изотерм

В программе предусмотрен вывод температуры в заданных точках, определяемых в системе координат (Y, Z) с началом в левой точке нижней стороны сечения. При этом ось Y направляется вправо по нижней стороне сечения, а ось Z - вверх по левой стороне прямоугольного сечения или по левой стороне ребра таврового сечения.

4.2 Проверка прочности при действии изгибающего момента

Усилия в балке определяются при помощи линейного расчета. Производится выбор изгибающих моментов, для которых проводится проверка прочности. В качестве расчетных моментов принимаются наибольшие по абсолютному значению положительный и отрицательный моменты M_+, M_- .

Предельное значение момента выражается через действующий момент по формуле $M_u = \gamma_u \cdot M$. Несущая способность исчерпывается, когда предельный момент M_u в одном из сечений балки становится равным расчетному моменту M .

Предельный изгибающий момент определяется на основе диаграмм деформирования сжатого бетона и арматуры с учетом зависимости диаграмм от температуры согласно [1]. Нормативные сопротивления сжатого бетона и арматуры при нормальной температуре принимаются согласно [2].

Для каждого расчетного изгибающего момента в текущий момент времени определяется коэффициент запаса прочности γ_u и строится зависимость наименьшего значения γ_u от времени. Предел огнестойкости определяется по моменту времени, при котором $\gamma_u = 1$ (рис.8).

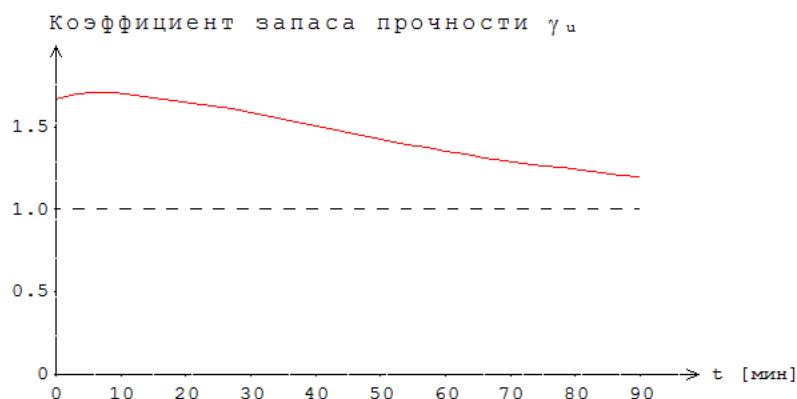


Рис.8. Пример зависимости коэффициента γ_u от времени

4.3 Проверка прочности при действии поперечной силы

Проверка прочности при действии поперечной силы Q проводится согласно [1], 8.29 для момента времени, соответствующего требуемому пределу огнестойкости. Расчет при огневом воздействии аналогичен расчету при нормальной температуре по [2] и включает расчет по полосе между наклонными сечениями и расчет по наклонным сечениям. В расчете при огневом воздействии производится редукция сечения с учетом глубины прогрева бетона до 500°C для бетона с силикатным заполнителем и 600°C для бетона с карбонатным заполнителем. Размеры редуцированного сечения обозначаются как b_t, h_t . В качестве расчетных сопротивлений бетона R_b, R_{bt} принимаются нормативные значения R_{bn}, R_{btn} при нормальной температуре согласно [2]. Расчетное сопротивление поперечной арматуры R_{swt} принимается равным сопротивлению стали при наибольшей температуре хомутов.

Условие прочности по наклонному сечению представляется в виде $Q/(Q_b + Q_{sw}) \leq 1$. Значение Q_{sw} не учитывается при расчете, если $q_{sw} = R_{swt} A_{sw} / s_w < 0.25 R_{btn} b_t$ или $s_w > s_{w, \max} = R_{btn} b_t h_{0t}^2 / Q$.

Учет влияния продольной силы производится согласно [2], 8.1.34. Среднее напряжение от действия продольной силы определяется по площади редуцированного сечения.

4.4 Нелинейный расчет усилий

Нелинейный расчет усилий проводится для момента времени, соответствующего требуемому пределу огнестойкости, в случае статически неопределимой балки, если обеспечена несущая способность балки при действии изгибающего момента и поперечной силы, полученных по линейному расчету.

В нелинейном расчете, кривизна κ определяется на основе диаграмм деформирования сжатого бетона и арматуры при огневом воздействии. Из-за нелинейного характера зависимости $\kappa(M)$ система уравнений поперечного изгиба является нелинейной. Балка разбивается на участки, в пределах которых производится линейризация уравнений. Предусмотрен ввод номинального

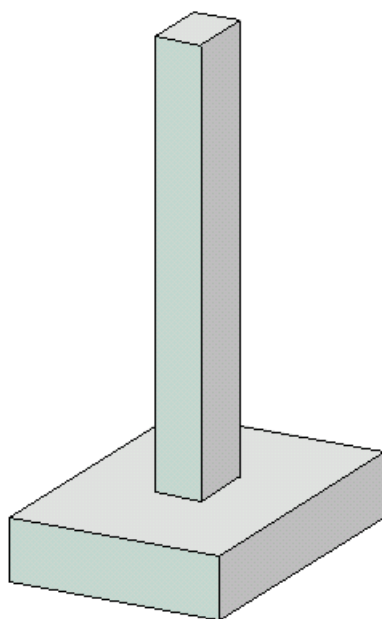
шага дискретизации балки. Нелинейный расчет проводится при помощи метода итераций. Итерационный процесс оканчивается тогда, когда относительные приращения момента M и прогиба W становятся малыми. Для контроля точности результатов нелинейного расчета выводится итерационная погрешность ε [%].

Для значений изгибающего момента, полученных по нелинейному расчету, проводится проверка несущей способности балки.

Литература

1. СП 468.1325800.2019 «Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности».
2. СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения».
3. ГОСТ 30247.0-94 Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования.
4. DIN EN 1991-1-2 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Brandeinwirkungen auf Tragwerke. September 2003.

407 – Расчет ж/б колонны по огнестойкости



Программа предназначена для расчёта по огнестойкости одноярусной железобетонной колонны согласно СП 468.1325800.2019 [1] и СП 63.13330.2018 [2]. Усилия в колонне определяются при помощи линейного или нелинейного расчета по деформированной или недеформированной схеме. Температурное поле в сечении колонны при огневом воздействии определяется путем решения задачи нестационарной теплопроводности с учетом зависимости теплофизических характеристик бетона от температуры. Проверка прочности при действии продольной силы и изгибающих моментов производится на основе диаграмм деформирования сжатого бетона и арматуры с учетом коэффициентов условий работы, зависящих от температуры.

1. Расчетная схема и сечение

Расчетная схема колонны представляет собой стержневой элемент, имеющий упругие или жесткие закрепления краев. Условия закрепления формулируются для горизонтального перемещения и поворота сечения вокруг горизонтальной оси. При расчете колонны, применяется система координат x, y, z , начало которой совпадает с центром тяжести нижнего сечения колонны. Ось x направлена снизу вверх. Предполагается, что вертикальная сила воспринимается в нижней опоре.

Рассматриваются колонны прямоугольного, круглого, уголкового и таврового сечений (рис.1).

Для прямоугольного сечения предусмотрены следующие схемы армирования: 1) арматура располагается в углах сечения, 2) арматура располагается вдоль контура сечения, 3) арматура располагается произвольным образом. При первой схеме армирования, в каждом углу сечения располагается один стержень. При второй схеме армирования, стержни располагаются в углах и вдоль сторон сечения. В этом случае задаются числа промежуточных стержней, расположенных вдоль сторон сечения. Диаметры угловых и промежуточных стержней могут быть различными. При третьей схеме армирования задаются ряды стержней. Для каждого ряда стержней задаются координаты начала и конца отрезка, на котором размещаются арматурные стержни. Для удобства ввода применяется система координат (Y, Z) с началом в левой точке нижней стороны сечения. Ось Y направляется вправо по нижней стороне сечения, а ось Z - вверх по левой стороне сечения. Задаются число стержней в ряду и диаметр стержней. При вводе одиночного стержня задается только первая пара координат. Предусмотрен контроль расстояния между арматурными стержнями.

В круглом сечении арматурные стержни равномерно распределяются вдоль окружности. Предусмотрены два варианта размещения стержней в зависимости от расположения первого стержня на оси y или на оси z .

Для уголкового сечения предусмотрены следующие схемы армирования: 1) арматура располагается в углах сечения, 2) арматура располагается вдоль контура сечения, 3) арматура располагается произвольным образом.

Для таврового сечения может быть задана верхняя и/или нижняя арматура, а также произвольно расположенные ряды арматурных стержней. Для ввода рядов стержней применяется система координат (Y, Z) с началом в левой точке нижней стороны ребра. Ось Y направляется вправо по нижней стороне ребра, а ось Z - вверх по левой стороне ребра.

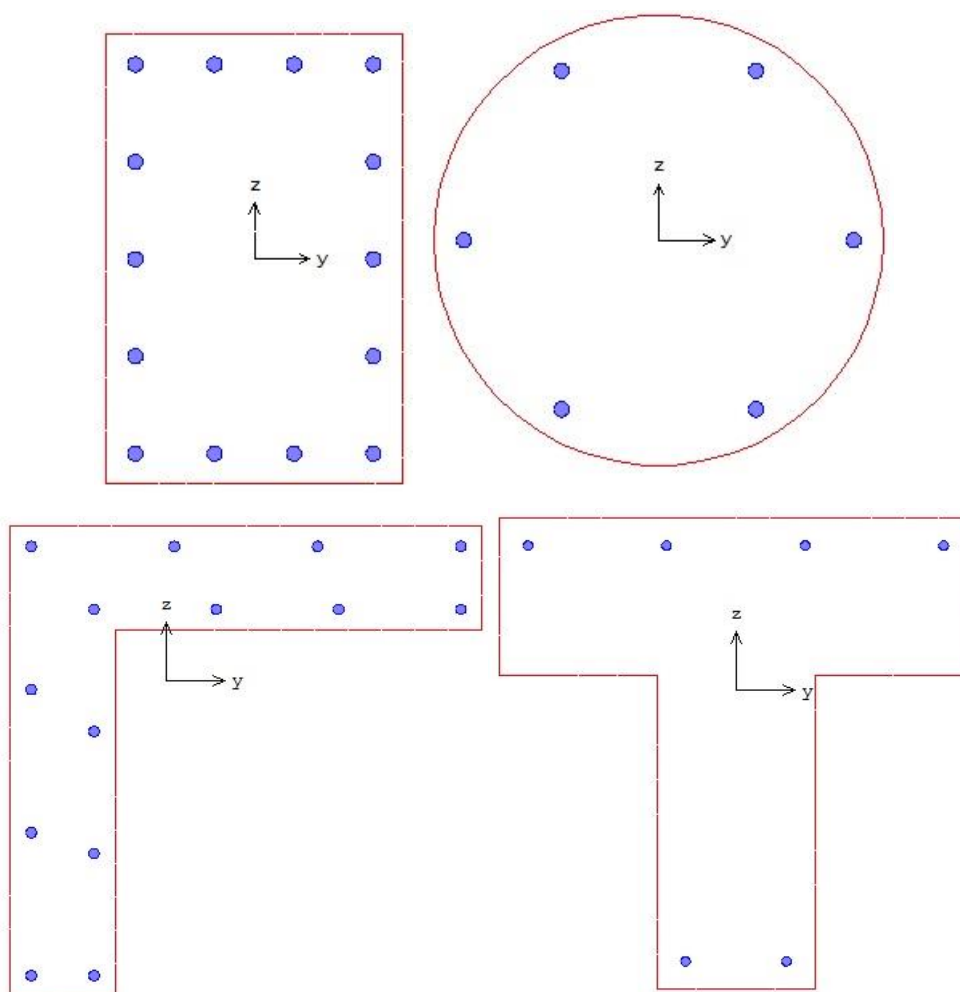


Рис.1. Сечения колонны

2. Нагрузки

Согласно [1], расчет по огнестойкости проводится для наиболее неблагоприятного сочетания нормативных постоянных и длительных нагрузок.

Положительные направления нагрузок показаны на рис.2. Положительные направления моментов совпадают с направлениями моментов от вертикальной силы, смещенной в положительных направлениях осей y и z . Положительные направления смещений жестких опор совпадают с направлениями координатных осей. Положительные направления поворотов жестких опор совпадают с положительными направлениями моментов.

3. Материалы

Класс бетона и класс арматуры принимаются согласно [2]. Расчет проводится для бетонов до класса В55 включительно. Диаграммы деформирования бетона и арматуры при нормальной температуре приведены на рис. 3, 4. По горизонтальной оси откладывается значение деформации в промилле ($1\text{‰}=0.1\%=0.001$). Отрицательные значения соответствуют деформации сжатия.

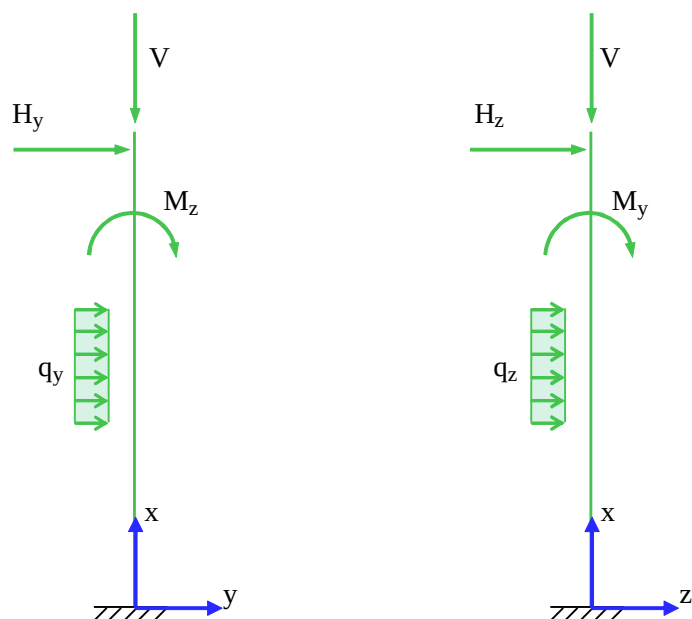


Рис. 2. Положительные направления нагрузок

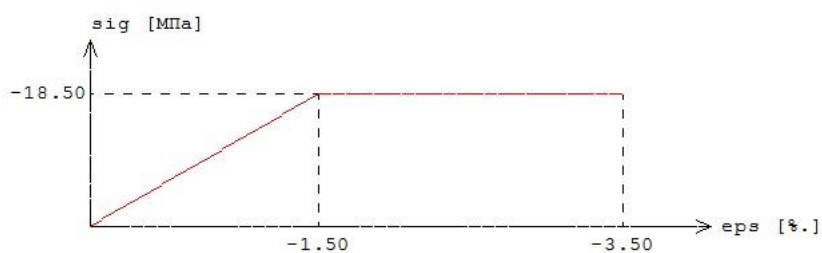


Рис.3. Диаграмма деформирования сжатого бетона В25 при нормальной температуре

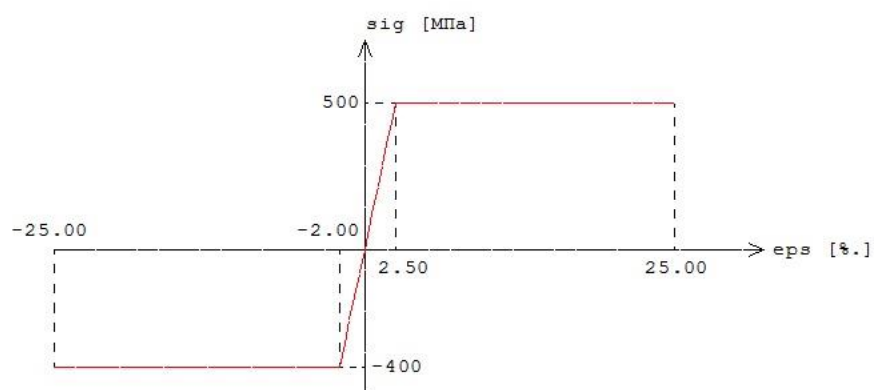


Рис.4. Диаграмма деформирования арматуры А500 при нормальной температуре

Расчетные сопротивления и модули упругости материалов при нагреве определяются по формулам [1].

$$R_{bnt} = R_{bn} \gamma_{bt}$$

$$E_{bt} = E_b \beta_b$$

$$R_{snt} = R_{sn} \gamma_{st}$$

$$E_{st} = E_s \beta_s$$

Значения коэффициента условий работы бетона γ_{bt} и коэффициента редукции модуля упругости бетона β_b принимаются по таблице 5.1 [1], параметры диаграммы для бетона $\varepsilon_{b1}, \varepsilon_{b2}$ - по таблице 5.5 [1]. Значения коэффициента условий работы арматуры γ_{st} и коэффициента редукции модуля упругости арматуры β_s принимаются по таблице 5.6 [1]. Предельная деформация арматуры ε_{s2} принимается равной 25‰ при $20^\circ\text{C} \leq T \leq 200^\circ\text{C}$ и равной 50‰ при $T \geq 500^\circ\text{C}$. При $200^\circ\text{C} < T < 500^\circ\text{C}$ предельная деформация ε_{s2} определяется интерполяцией

В программе возможен табличный вывод коэффициентов для заданного вида заполнителя в бетоне и класса арматуры.

4. Расчет по огнестойкости

Огнестойкость элемента характеризуется периодом времени (в минутах) от начала пожара до момента возникновения предельного состояния элемента. Для несущих элементов предельным состоянием по огнестойкости является состояние, при котором происходит потеря несущей способности. Предельное состояние наступает тогда, когда предельные усилия становятся равными расчетным усилиям. В программе строится зависимость коэффициента запаса прочности γ_u от времени. Предел огнестойкости определяется по моменту времени, при котором $\gamma_u = 1$.

Экспериментально установлено, что разрушение железобетонного элемента при огневом воздействии происходит аналогично разрушению при нормальной температуре. Предельные усилия при огневом воздействии определяются на основе диаграмм деформирования сжатого бетона и арматуры при тех же предположениях, что и при нормальной температуре. Основными предположениями являются следующие: деформации распределяются по линейному закону, напряжения в растянутом бетоне пренебрежимо малы. При определении предельных усилий при огневом воздействии учитывается зависимость прочностных и деформационных характеристик материалов от температуры.

4.1 Определение температурного поля

Для определения предела огнестойкости, необходимо рассчитать температурное поле в сечении элемента от огневого воздействия. Температурное поле $T(y, z, t)$ определяется на основе уравнения нестационарной теплопроводности:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = c \rho \frac{\partial T}{\partial t}$$

Здесь λ - коэффициент теплопроводности, c - удельная теплоемкость, ρ - плотность материала. При расчете температуры в сечении элемента не учитывается наличие арматуры.

Коэффициент теплопроводности бетона в $[\text{Вт}/(\text{м}^\circ\text{C})]$ определяется по следующим формулам (см.[1], 6.3):

- для бетона на силикатном заполнителе $\lambda = 1.2 - 0.00035T$;

- для бетона на карбонатном заполнителе $\lambda = 1.14 - 0.00055T$.

Удельная теплоемкость бетона в $[Дж/(кг \cdot ^\circ C)]$ на силикатном или карбонатном заполнителе равна $c = 710 + 0.83T$. В программе предусмотрен учет влажности бетона согласно [5], при котором зависимость удельной теплоемкости от температуры характеризуется пиковым значением при $115^\circ C$, равным 1470 и 2020 при влажности 1.5% и 3% соответственно.

Огневое воздействие характеризуется зависимостью температуры среды от времени, отсчитываемого от начала пожара. Согласно [3], при стандартном пожаре, принимается следующая зависимость температуры среды от времени:

$$T_0 = 20 + 345 \lg(8t + 1), \text{ где } t - \text{ время в мин.}$$

График зависимости $T_0(t)$ представлен на рис.5.

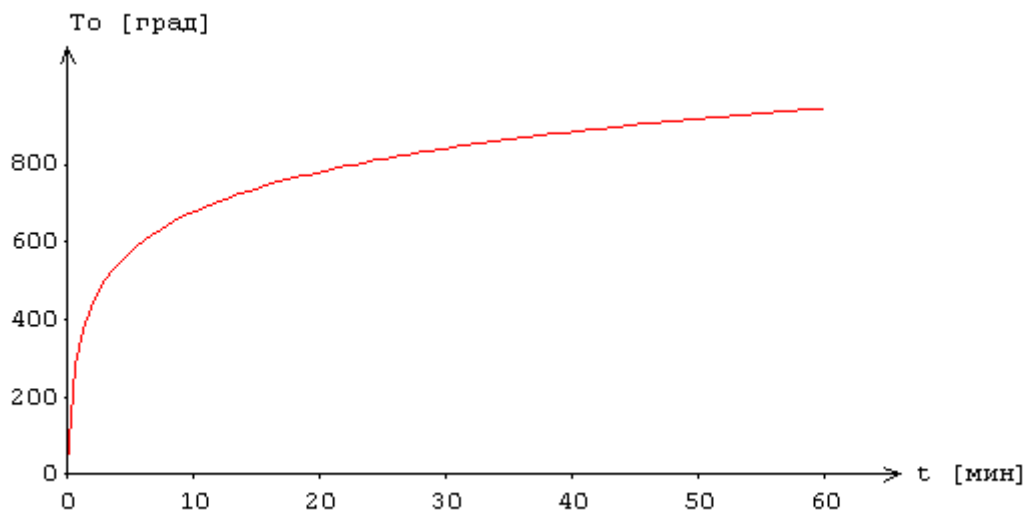


Рис.5. Зависимость температуры среды от времени

На сторонах сечения ставится условие равенства теплового потока от границы вглубь сечения и теплового потока к границе от среды.

Тепловой поток к контуру сечения от среды равен (см.[4],6.4 и [5],3.1).

$$Q = Q_c + Q_r$$

$$Q_c = \alpha_c (T_0 - T)$$

$$Q_r = 5.67\varepsilon[(0.01T_0 + 2.73)^4 - (0.01T + 2.73)^4]$$

Здесь Q_c - конвективный тепловой поток, Q_r - лучистый тепловой поток, T_0 - температура среды, T - температура на контуре сечения. Тепловой поток от контура вглубь сечения равен

$$Q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n}$$

где $\frac{\partial T}{\partial n}$ - производная по внутренней нормали к контуру сечения. Согласно [4], принимается

$\alpha_c = 29 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ C)$, $\varepsilon = 0.56$. На ненагреваемых сторонах ставится аналогичное условие при

$\alpha_c = 1.5\sqrt{T - 20} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ C)$, $\varepsilon = 0.63$.

Температурная задача решается конечноразностным методом. Производная $\frac{\partial T}{\partial t}$ заменяется разностным отношением $\frac{T(y, z, t + \Delta t) - T(y, z, t)}{\Delta t}$, где Δt - шаг по времени.

Расчет температурного поля в сечении производится для дискретных моментов времени. Шаг по времени может приниматься равным 3мин, 6мин, 12мин или задаваться другим значением в пределах от 1мин до 30мин. В общем случае, при увеличении шага, уменьшается объем вычислений, однако может снижаться точность результата.

Производные по координатам также заменяются разностными отношениями. После определения температуры на конечноразностной сетке температура в произвольной точке сечения определяется интерполяцией. В качестве примера на рис.6 приведены изотермы, полученные при трехстороннем нагреве прямоугольного сечения и всестороннем нагреве уголкового сечения.

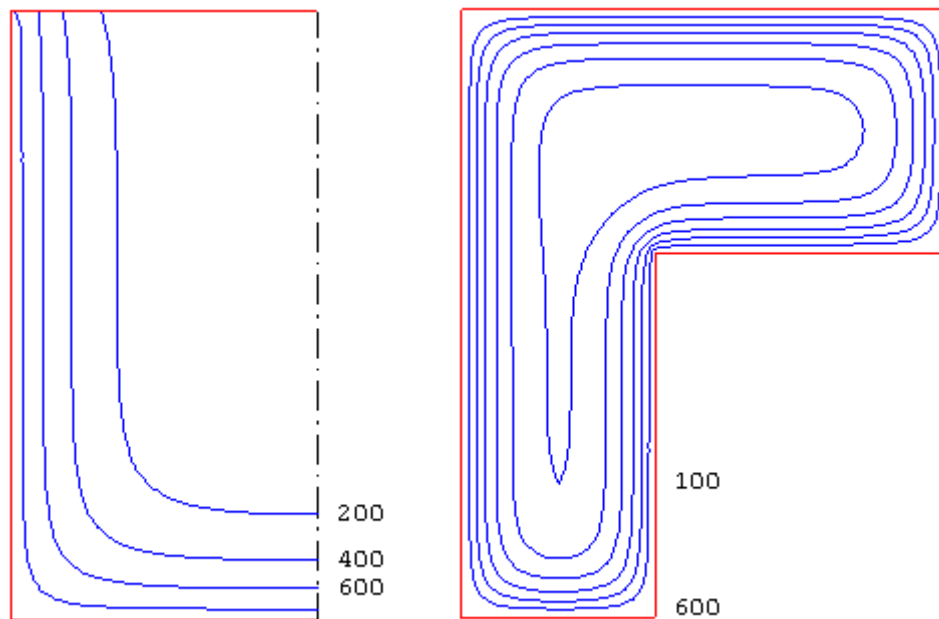


Рис.6. Изотермы

При вводе исходных данных программы, могут быть заданы управляющие параметры расчета температурного поля: номинальный шаг сетки S и максимальное число точек сетки в одном направлении $N_{\max}$. Если значение S не задано, то принимается $s = 10$ мм. Если значение $N_{\max}$ не задано, то принимается $N_{\max} = 60$. Аналогичные параметры могут быть заданы для управления разбиением сжатой зоны сечения на малые элементы при определении предельных усилий.

В программе предусмотрен вывод температуры в заданных точках, определяемых в системе координат (Y, Z) с началом в левой точке нижней стороны сечения. При этом ось Y направляется вправо по нижней стороне сечения, а ось Z - вверх либо по левой стороне прямоугольного или уголкового сечения, либо по левой стороне ребра таврового сечения. В случае круглого сечения, температура выводится для точек, лежащих на оси Y .

4.2 Расчет усилий

Усилия в колонне могут определяться на основе линейного или нелинейного расчета по деформированной или недеформированной схеме. При расчете по деформированной схеме возможен отказ от учета прогиба в одной или двух плоскостях. Если прогиб колонны в плоскости

Y или Z стеснен или невозможен, то для соответствующей плоскости расчет проводится по недеформированной схеме. При расчете по деформированной схеме предусмотрен учет несовершенства колонны путем учета начального прогиба по форме потери устойчивости центральносжатой колонны.

В линейном расчете усилия в колонне определяются при жесткостных характеристиках D_y, D_z приведенного сечения, вычисленных в предположении упругого деформирования бетона и арматуры. В случае уголкового сечения, дополнительно используется коэффициент жесткости D_{yz} , соответствующий центробежному моменту инерции сечения I_{yz} . Жесткостные характеристики определяются относительно центральных осей приведенного сечения, параллельных центральным осям бетонного сечения.

В нелинейном расчете кривизны K_y, K_z определяются на основе диаграмм деформирования сжатого бетона и арматуры при огневом воздействии. Из-за нелинейного характера зависимости кривизны от момента, система уравнений продольно-поперечного изгиба является нелинейной. Колонна разбивается на участки, в пределах которых производится линеаризация уравнений. Предусмотрен ввод номинального шага дискретизации колонны. Нелинейный расчет проводится при помощи метода итераций. Итерационный процесс оканчивается тогда, когда относительные приращения моментов M_y, M_z и прогибов w_y, w_z становятся малыми. Для контроля точности результатов нелинейного расчета выводится итерационная погрешность $\varepsilon [\%]$.

Возможен выбор режима расчета. При выборе первого режима, нелинейный расчет усилий проводится при достижении предела огнестойкости. При выборе второго режима, нелинейный расчет усилий проводится с шагом, кратным шагу для расчета температурного поля. Усилия, полученные по нелинейному расчету в текущий момент времени, используются для проверки прочности вплоть до следующего момента проведения нелинейного расчета. Время вычислений при втором режиме расчета может быть значительно больше, чем при первом режиме.

По результатам расчета усилий, производится выбор сочетаний усилий, для которых проводится проверка прочности. В общем случае, выбор сочетаний усилий производится с учетом знаков моментов. Выбираются такие сочетания усилий, для которых либо положительный, либо отрицательный изгибающий момент M_y или M_z принимает наибольшее абсолютное значение. В случае прямоугольного сечения со стандартной схемой армирования при всестороннем нагреве, а также в случае круглого сечения, выбор сочетаний усилий производится без учета знаков моментов.

4.3 Определение предельных усилий

Предельные усилия при огневом воздействии определяются на основе диаграмм деформирования сжатого бетона и арматуры с учетом зависимости характеристик материалов от температуры согласно [1]. Нормативные сопротивления сжатого бетона и арматуры при нормальной температуре принимаются согласно [2].

Предельные усилия принимаются пропорциональными расчетным усилиям: $N_u = \gamma_u N$, $M_{yu} = \gamma_u M_y$, $M_{zu} = \gamma_u M_z$. Прочность сечения обеспечена, если коэффициент γ_u не меньше единицы. Предполагается, что деформация в сечении распределяется по линейному закону $\varepsilon(y, z) = \varepsilon_0 + \kappa_y y + \kappa_z z$, где κ_y, κ_z - кривизны. Предельные усилия определяются на основе следующих уравнений:

$$\int_{A_b} \sigma_b dA + \int_{A_s} \sigma_s dA = \gamma_u N$$

$$\int_{A_b} \sigma_b z dA + \int_{A_s} \sigma_s z dA = \gamma_u M_y$$

$$\int_{A_b} \sigma_b y dA + \int_{A_s} \sigma_s y dA = -\gamma_u M_z$$

Здесь $\sigma_b = f_b(\varepsilon, T)$ - напряжение в сжатом бетоне, $\sigma_s = f_s(\varepsilon, T)$ - напряжение в арматуре, $T = T(y, z, t)$ - температура, A_b - сжатая зона бетонного сечения, A_s - сечение арматуры.

Для вычисления интегралов по A_b производится разбиение сжатой зоны сечения на малые элементы, в пределах которых напряжение принимается постоянным. Определение интегралов сводится к вычислению конечных сумм. При вычислении интегралов по A_s принимается, что площадь сечения арматурного стержня сосредоточена в его центре. Температура арматурного стержня принимается равной температуре в точке, совпадающей с центром сечения стержня.

Распределение деформации в предельном состоянии $\varepsilon_u(y, z)$ отыскивается из ограничения деформации сжатого бетона значением ε_{b2} и из ограничения деформации растянутой арматуры значением ε_{s2} . Для каждого положения нейтральной линии однозначно определяется распределение деформации в предельном состоянии. В результате решения системы трех нелинейных уравнений определяется положение нейтральной линии и коэффициент запаса прочности γ_u . На рис.7 приведен пример зависимости коэффициента γ_u от времени при стандартном пожаре.

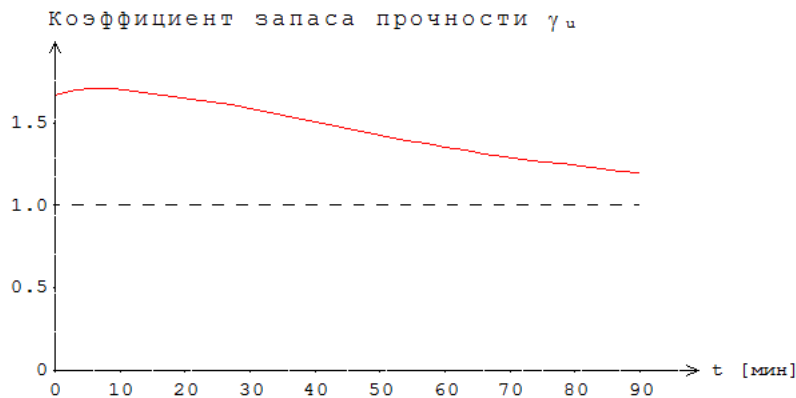


Рис.7. Пример зависимости коэффициента γ_u от времени

В программе предусмотрен вывод результатов расчета предельных усилий для предела огнестойкости. Помимо предельных усилий, выводятся кривизны, максимальные и минимальные (в алгебраическом смысле) деформации бетона и арматуры. Если предельная деформация бетона достигается в точке, лежащей внутри сжатой зоны, то выводятся координаты этой точки, температура T и предельное значение деформации $\varepsilon_{b2}(T)$. В случае, когда нейтральная линия пересекает сечение элемента, выводится изображение сжатой зоны сечения (рис.8).

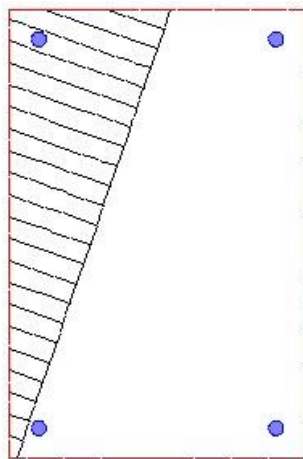


Рис.8. Пример изображения сжатой зоны сечения

4.4 Учет влияния прогиба

При учете влияния прогиба сжатого элемента величина расчетного момента определяется путем умножения изгибающего момента M , найденного на основе недеформированной схемы, на повышающий коэффициент

$$\eta = \frac{1}{1 - \frac{N}{N_{cr}}}$$

Здесь N_{cr} - критическая продольная сила, которая вычисляется по формуле:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 D}{l_0^2}$$

где l_0 - расчетная длина сжатого элемента. Жесткость D при нормальной температуре вычисляется согласно [2] по формуле:

$$D = \frac{0.15 E_b I_b}{\varphi_l (0.3 + \delta_e)} + 0.7 E_s I_s$$

Здесь E_b, E_s - модули упругости бетона и арматуры; I_b, I_s - моменты инерции бетонного сечения и сечения арматуры относительно центральной оси сечения, $\delta_e = e_0 / h$ - относительный эксцентриситет продольной силы, h - высота сечения в плоскости изгиба. Коэффициент φ_l принимается равным 2.

При определении эксцентриситета e_0 учитывается случайный эксцентриситет e_a [2]. При расчете элемента статически определимой конструкции эксцентриситет e_0 принимается равным $M / N + e_a$, а при расчете элемента статически неопределимой конструкции – равным M / N , если $M / N \geq e_a$, и равным e_a , если $M / N < e_a$.

При расчете по огнестойкости модули упругости равны:

$$E_{bt} = \beta_b(T) E_b, \quad E_{st} = \beta_s(T) E_s$$

где $\beta_b(T)$, $\beta_s(T)$ - коэффициенты редукции модуля упругости бетона и арматуры, зависящие от температуры T . При неравномерном нагреве сечения $T = T(y, z)$ и, следовательно, модули упругости зависят от y, z .

В программе выражение для жесткости представляется в виде:

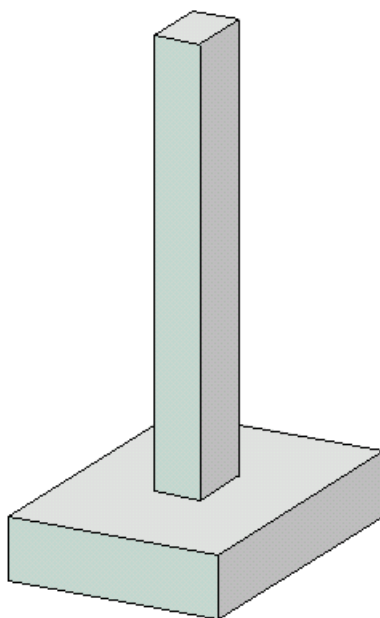
$$D = \frac{0.15}{\varphi_l(0.3 + \delta_e)} D_b + 0.7 D_s$$

Сечение разбивается на малые элементы, в пределах которых температура принимается постоянной. Тогда величина D_b определяется как $D_b = \sum \beta_{b,i} E_b I_{b,i}$, где $\beta_{b,i} = \beta_b(T_i)$, $I_{b,i}$ - момент инерции площади малого элемента относительно оси изгиба. Величина D_s определяется как $D_s = \sum \beta_{s,i} E_s I_{s,i}$, где $\beta_{s,i} = \beta_s(T_i)$, $I_{s,i}$ - момент инерции площади сечения арматурного стержня относительно оси изгиба.

Литература

1. СП 468.1325800.2019 «Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности».
2. СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения».
3. ГОСТ 30247.0-94 Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования.
4. МДС 21-2.2000 Методические рекомендации по расчету огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций / ГУП «НИИЖБ», ФГУП ЦПП. – М., 2000.
5. DIN EN 1991-1-2 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Brandeinwirkungen auf Tragwerke. September 2003.

412 – Расчет сталежелезобетонной колонны по огнестойкости



Программа предназначена для расчёта по огнестойкости одноярусной сталежелезобетонной колонны согласно СП 468.1325800.2019 [1], СП 63.13330.2018 [2], СП 16.13330.2017 [3], СП 266.1325800.2016 [4]. Усилия в колонне определяются при помощи линейного или нелинейного расчета по деформированной или недеформированной схеме. Температурное поле в сечении колонны при огневом воздействии определяется путем решения задачи нестационарной теплопроводности с учетом зависимости теплофизических характеристик бетона от температуры. Проверка прочности при действии продольной силы и изгибающих моментов производится на основе диаграмм деформирования сжатого бетона, арматуры и конструкционной стали с учетом коэффициентов условий работы, зависящих от температуры.

1. Расчетная схема и сечение

Расчетная схема колонны представляет собой стержневой элемент, имеющий упругие или жесткие закрепления краев. Условия закрепления формулируются для горизонтального перемещения и поворота сечения вокруг горизонтальной оси. При расчете колонны применяется система координат x, y, z , начало которой совпадает с центром тяжести нижнего сечения колонны. Ось x направлена снизу вверх. Предполагается, что вертикальная сила воспринимается в нижней опоре.

Рассматриваются колонны прямоугольного сечения с жесткой арматурой (рис.1).

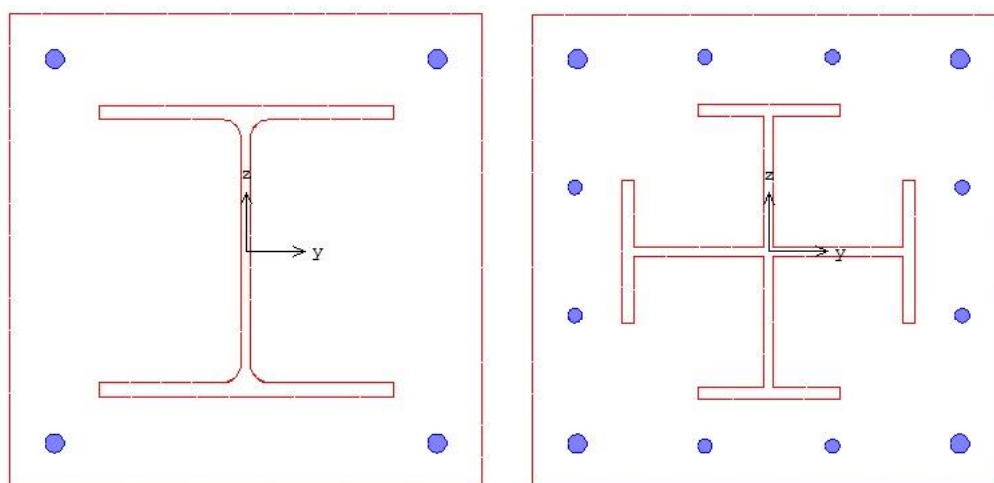


Рис. 1. Сечения с жесткой арматурой

Предусмотрены следующие схемы армирования: 1) арматура располагается в углах сечения, 2) арматура располагается вдоль контура сечения. При второй схеме армирования, стержни располагаются в углах и вдоль сторон сечения. В этом случае задаются числа промежуточных стержней, расположенных вдоль сторон сечения. Диаметры угловых и промежуточных стержней могут быть различными.

В случае сечения первого вида (см.рис.1), двутавр может выбираться из сортамента прокатных двутавров или может задаваться сварным. В случае сечения второго вида, жесткая арматура рассматривается как профиль из четырех тавров.

2. Нагрузки

Согласно [1], расчет по огнестойкости проводится для наиболее неблагоприятного сочетания нормативных постоянных и длительных нагрузок.

Положительные направления нагрузок показаны на рис.2. Положительные направления моментов совпадают с направлениями моментов от вертикальной силы, смещенной в положительных направлениях осей y и z . Положительные направления смещений жестких

опор совпадают с направлениями координатных осей. Положительные направления поворотов жестких опор совпадают с положительными направлениями моментов.

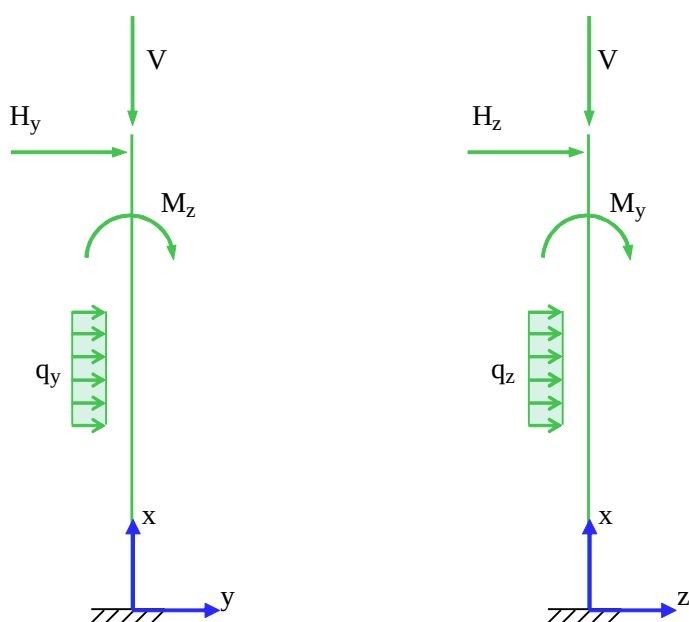


Рис. 2. Положительные направления нагрузок

3. Материалы

Класс бетона и класс арматуры принимаются согласно [2]. Расчет проводится для бетонов до класса B55 включительно. Диаграммы деформирования бетона и арматуры при нормальной температуре приведены на рис. 3, 4. По горизонтальной оси откладывается значение деформации в промилле ($1\text{‰} = 0.1\% = 0.001$). Отрицательные значения соответствуют деформации сжатия.

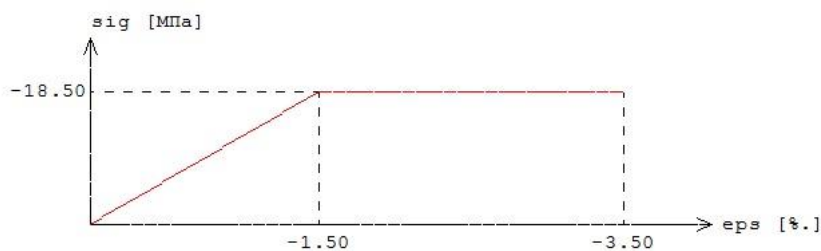


Рис.3. Диаграмма деформирования сжатого бетона B25 при нормальной температуре

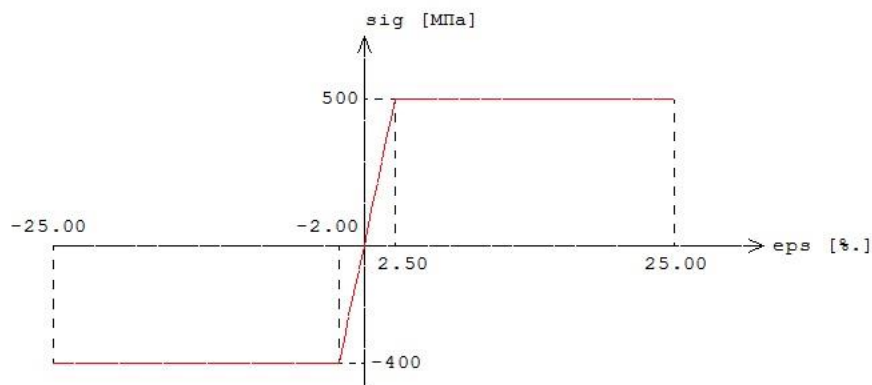


Рис.4. Диаграмма деформирования арматуры A500 при нормальной температуре

Расчетные сопротивления и модули упругости материалов при нагреве определяются по формулам [1]:

$$R_{bnt} = R_{bn} \gamma_{bt}$$

$$E_{bt} = E_b \beta_b$$

$$R_{snt} = R_{sn} \gamma_{st}$$

$$E_{st} = E_s \beta_s$$

Значения коэффициента условий работы бетона γ_{bt} и коэффициента редукции модуля упругости бетона β_b принимаются по таблице 5.1 [1], параметры диаграммы для бетона $\varepsilon_{b1}, \varepsilon_{b2}$ - по таблице 5.5 [1]. Значения коэффициента условий работы арматуры γ_{st} и коэффициента редукции модуля упругости арматуры β_s принимаются по таблице 5.6 [1]. Предельная деформация арматуры ε_{s2} принимается равной 25‰ при $20^\circ\text{C} \leq T \leq 200^\circ\text{C}$ и равной 50‰ при $T \geq 500^\circ\text{C}$. При $200^\circ\text{C} < T < 500^\circ\text{C}$ предельная деформация ε_{s2} определяется интерполяцией.

Класс конструкционной стали принимается согласно [3]. Диаграмма деформирования стали при нормальной температуре приведена на рис.5.

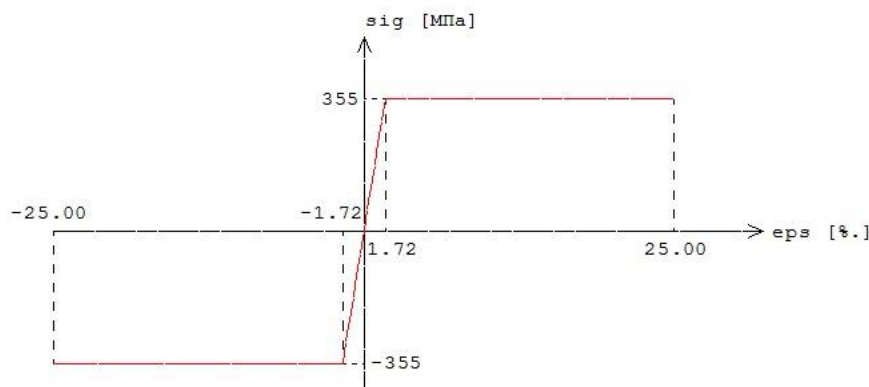


Рис.5. Диаграмма деформирования стали С375 при нормальной температуре

Расчетное сопротивление и модуль упругости стали при нагреве определяются по формулам:

$$R_{ynt} = R_{yn} \gamma_{st}$$

$$E_t = E \beta_{st}$$

Значения коэффициента условий работы стали γ_{st} и коэффициента редукции модуля упругости стали β_{st} принимаются по таблице 3.2 [6] (рис.6).

Коэффициент условий работы стали

№	T [°C]	γ_{st}	№	T [°C]	γ_{st}	№	T [°C]	γ_{st}
1	100	1.00	2	200	1.00	3	300	1.00
4	400	1.00	5	500	0.78	6	600	0.47
7	700	0.23	8	800	0.11	9	900	0.06
10	1000	0.04	11	1100	0.02	12	1200	0.00

Коэффициент редукции модуля упругости стали

№	T [°C]	β_{st}	№	T [°C]	β_{st}	№	T [°C]	β_{st}
1	100	1.00	2	200	0.90	3	300	0.80
4	400	0.70	5	500	0.60	6	600	0.31
7	700	0.13	8	800	0.09	9	900	0.07
10	1000	0.04	11	1100	0.02	12	1200	0.00

Рис.6. Значения γ_{st} , β_{st}

В программе возможен табличный вывод коэффициентов для заданного вида заполнителя в бетоне и класса арматуры.

4. Расчет по огнестойкости

Огнестойкость элемента характеризуется периодом времени (в минутах) от начала пожара до момента возникновения предельного состояния элемента. Для несущих элементов предельным состоянием по огнестойкости является состояние, при котором происходит потеря несущей способности. Предельное состояние наступает тогда, когда предельные усилия становятся равными расчетным усилиям. В программе строится зависимость коэффициента запаса прочности γ_u от времени. Предел огнестойкости определяется по моменту времени, при котором $\gamma_u = 1$.

Экспериментально установлено, что разрушение железобетонного элемента при огневом воздействии происходит аналогично разрушению при нормальной температуре. Предельные усилия при огневом воздействии определяются на основе диаграмм деформирования сжатого бетона, арматуры и конструкционной стали при тех же предположениях, что и при нормальной температуре. Основными предположениями являются следующие: деформации распределяются по линейному закону, напряжения в растянутом бетоне пренебрежимо малы. При определении предельных усилий при огневом воздействии учитывается зависимость прочностных и деформационных характеристик материалов от температуры.

4.1 Определение температурного поля

Для определения предела огнестойкости необходимо рассчитать температурное поле в сечении элемента от огневого воздействия. Температурное поле $T(y, z, t)$ определяется на основе уравнения нестационарной теплопроводности:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = c \rho \frac{\partial T}{\partial t}$$

Здесь λ - коэффициент теплопроводности, c - удельная теплоемкость, ρ - плотность материала. При расчете температуры в сечении элемента не учитывается наличие арматуры.

Коэффициент теплопроводности бетона в [Вт/(м⁰С)] определяется по следующим формулам (см.[1], 6.3):

- для бетона на силикатном заполнителе $\lambda = 1.2 - 0.00035T$;
- для бетона на карбонатном заполнителе $\lambda = 1.14 - 0.00055T$.

Удельная теплоемкость бетона в $[Дж/(кг \cdot ^\circ C)]$ на силикатном или карбонатном заполнителе равна $c = 710 + 0.83T$. В программе предусмотрен учет влажности бетона согласно [7], при котором зависимость удельной теплоемкости от температуры характеризуется пиковым значением при $115^\circ C$, равным 1470 и 2020 при влажности 1.5% и 3% соответственно.

Огневое воздействие характеризуется зависимостью температуры среды от времени, отсчитываемого от начала пожара. Согласно [5], при стандартном пожаре принимается следующая зависимость температуры среды от времени:

$$T_0 = 20 + 345 \lg(8t + 1), \text{ где } t - \text{ время в мин.}$$

График зависимости $T_0(t)$ представлен на рис.7.

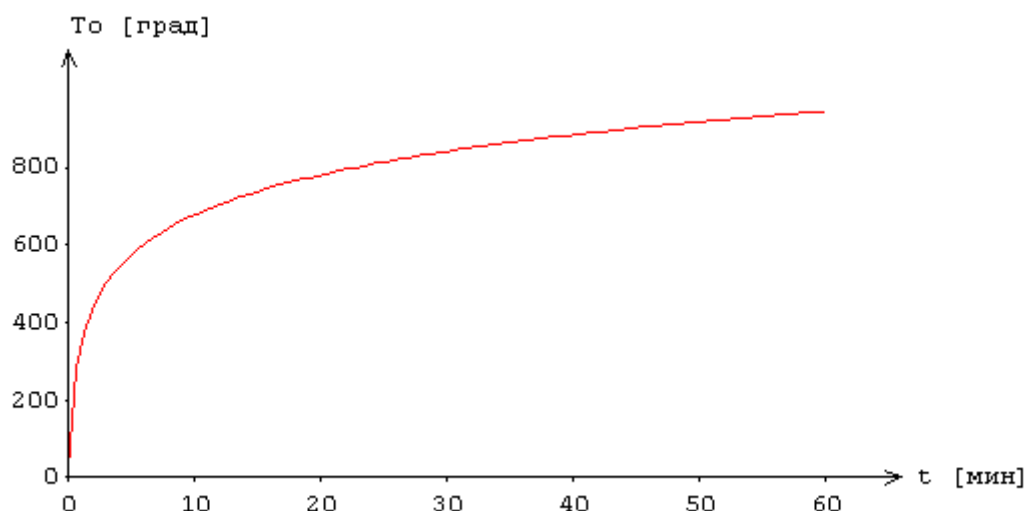


Рис.7. Зависимость температуры среды от времени

На сторонах сечения ставится условие равенства теплового потока от границы вглубь сечения и теплового потока к границе от среды.

Температурная задача решается конечноразностным методом. Производная $\frac{\partial T}{\partial t}$ заменяется разностным отношением:

$$\frac{T(y, z, t + \Delta t) - T(y, z, t)}{\Delta t}$$

где Δt - шаг по времени. Расчет температурного поля в сечении производится для дискретных моментов времени. Шаг по времени может приниматься равным 3мин, 6мин, 12мин или задаваться другим значением в пределах от 1мин до 30мин. В общем случае, при увеличении шага, уменьшается объем вычислений, однако может снижаться точность результата.

Производные по координатам также заменяются разностными отношениями. После определения температуры на конечноразностной сетке температура в произвольной точке сечения определяется интерполяцией. В качестве примера на рис.8 приведены изотермы, полученные при трехстороннем нагреве прямоугольного сечения.

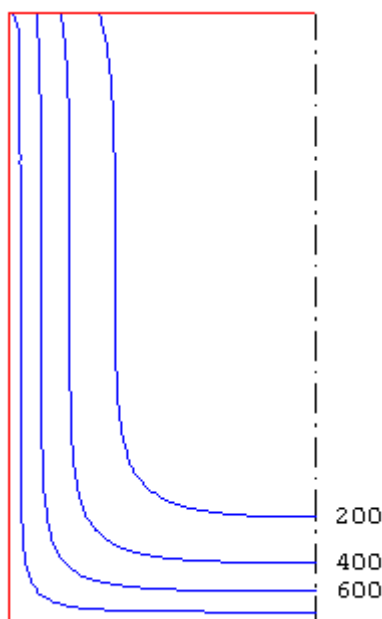


Рис.8. Изотермы

При вводе исходных данных программы могут быть заданы управляющие параметры расчета температурного поля: номинальный шаг сетки s и максимальное число точек сетки в одном направлении $N_{\max}$. Если значение s не задано, то принимается $s = 10$ мм. Если значение $N_{\max}$ не задано, то принимается $N_{\max} = 60$. Аналогичные параметры могут быть заданы для управления разбиением сжатой зоны сечения на малые элементы при определении предельных усилий.

В программе предусмотрен вывод температуры в заданных точках, определяемых в системе координат (Y, Z) с началом в левой точке нижней стороны сечения. При этом ось Y направляется вправо по нижней стороне сечения, а ось Z - вверх по левой стороне сечения.

4.2 Расчет усилий

Усилия в колонне могут определяться на основе линейного или нелинейного расчета по деформированной или недеформированной схеме. При расчете по деформированной схеме возможен отказ от учета прогиба в одной или двух плоскостях. Если прогиб колонны в плоскости Y или Z стеснен или невозможен, то для соответствующей плоскости расчет проводится по недеформированной схеме. При расчете по деформированной схеме предусмотрен учет несовершенства колонны путем учета начального прогиба по форме потери устойчивости центральносжатой колонны.

В линейном расчете, усилия в колонне определяются при жесткостных характеристиках D_y, D_z приведенного сечения, вычисленных в предположении упругого деформирования бетона, арматуры и конструкционной стали.

В нелинейном расчете, кривизны κ_y, κ_z определяются на основе диаграмм деформирования сжатого бетона, арматуры и конструкционной стали при огневом воздействии. Из-за нелинейного характера зависимости кривизны от момента, система уравнений продольно-поперечного изгиба является нелинейной. Колонна разбивается на участки, в пределах которых производится линеаризация уравнений. Предусмотрен ввод номинального шага дискретизации колонны. Нелинейный расчет проводится при помощи метода итераций. Итерационный процесс оканчивается тогда, когда относительные приращения моментов M_y, M_z и прогибов w_y, w_z

становятся малыми. Для контроля точности результатов нелинейного расчета выводится итерационная погрешность ε [%].

Возможен выбор режима расчета. При выборе первого режима, нелинейный расчет усилий проводится при достижении предела огнестойкости. При выборе второго режима, нелинейный расчет усилий проводится с шагом, кратным шагу для расчета температурного поля. Усилия, полученные по нелинейному расчету в текущий момент времени, используются для проверки прочности вплоть до следующего момента проведения нелинейного расчета. Время вычислений при втором режиме расчета может быть значительно больше, чем при первом режиме.

По результатам расчета усилий производится выбор сочетаний усилий, для которых проводится проверка прочности. В общем случае, выбор сочетаний усилий производится с учетом знаков моментов. Выбираются такие сочетания усилий, для которых либо положительный, либо отрицательный изгибающий момент M_y или M_z принимает наибольшее абсолютное значение.

4.3 Определение предельных усилий

Предельные усилия принимаются пропорциональными расчетным усилиям: $N_u = \gamma_u N$, $M_{yu} = \gamma_u M_y$, $M_{zu} = \gamma_u M_z$. Прочность сечения обеспечена, если коэффициент γ_u не меньше единицы. Предполагается, что деформации в сечении распределяются по линейному закону $\varepsilon(y, z) = \varepsilon_0 + \kappa_y y + \kappa_z z$, где κ_y, κ_z - кривизны. Предельные усилия определяются на основе следующих уравнений:

$$\begin{aligned} \int_{A_b} \sigma_b dA + \int_{A_s} \sigma_s dA + \int_{A_p} \sigma_p dA &= \gamma_u N \\ \int_{A_b} \sigma_b z dA + \int_{A_s} \sigma_s z dA + \int_{A_p} \sigma_p z dA &= \gamma_u M_y \\ \int_{A_b} \sigma_b y dA + \int_{A_s} \sigma_s y dA + \int_{A_p} \sigma_p y dA &= -\gamma_u M_z \end{aligned}$$

Здесь $\sigma_b = f_b(\varepsilon, T)$ - напряжение в сжатом бетоне, $\sigma_s = f_s(\varepsilon, T)$ - напряжение в гибкой арматуре, $\sigma_p = f_p(\varepsilon, T)$ - напряжение в жесткой арматуре, $T = T(y, z, t)$ - температура, A_b - сжатая зона бетонного сечения, A_s - сечение гибкой арматуры, A_p - сечение жесткой арматуры.

Для вычисления интегралов по A_b производится разбиение сжатой зоны сечения на малые элементы, в пределах которых напряжение принимается постоянным. Определение интегралов сводится к вычислению конечных сумм. При вычислении интегралов по A_s принимается, что площадь сечения арматурного стержня сосредоточена в его центре. Температура арматурного стержня принимается равной температуре в точке, совпадающей с центром сечения стержня. Вычисление интегралов по A_p производится как для полигонального контура. Температура жесткой арматуры принимается равной наибольшей температуре на контуре профиля.

Распределение деформации в предельном состоянии $\varepsilon_u(y, z)$ отыскивается из ограничения деформации сжатого бетона значением ε_{b2} , из ограничения деформации растянутой гибкой арматуры значением ε_{s2} , из ограничения деформации жесткой арматуры значением 2.5%=25промилле. Для каждого положения нейтральной линии однозначно определяется распределение деформации в предельном состоянии. В результате решения системы трех нелинейных уравнений определяется положение нейтральной линии и коэффициент запаса

прочности γ_u . На рис.9 приведен пример зависимости коэффициента γ_u от времени при стандартном пожаре.

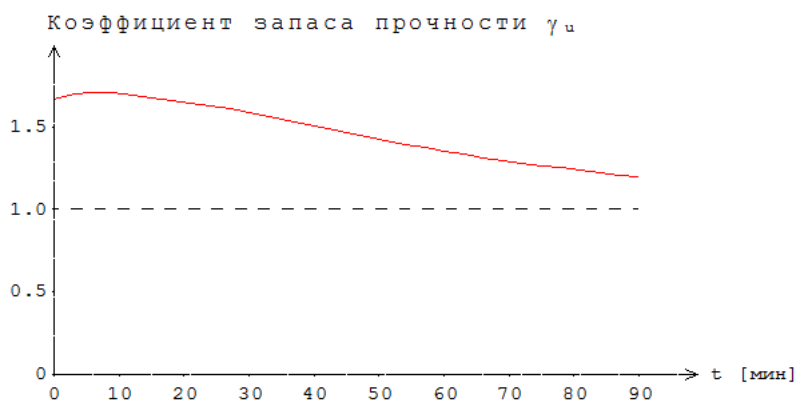


Рис.9. Пример зависимости коэффициента γ_u от времени

В программе предусмотрен вывод результатов расчета предельных усилий для предела огнестойкости. Помимо предельных усилий, выводятся кривизны, максимальные и минимальные (в алгебраическом смысле) деформации бетона и арматуры. Если предельная деформация бетона достигается в точке, лежащей внутри сжатой зоны, то выводятся координаты этой точки, температура T и предельное значение деформации $\varepsilon_{b2}(T)$. В случае, когда нейтральная линия пересекает сечение элемента, выводится изображение сжатой зоны сечения (рис.10).

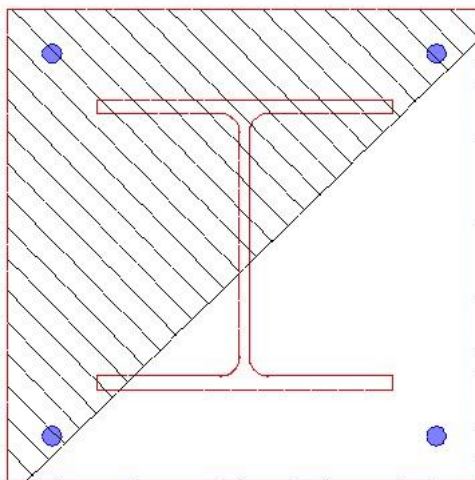


Рис.10. Пример изображения сжатой зоны сечения

4.4 Учет влияния прогиба

При расчете усилий в колонне по недеформированной схеме, величина расчетного момента определяется путем умножения изгибающего момента M на повышающий коэффициент

$$\eta = \frac{1}{1 - \frac{N}{N_{cr}}}$$

Здесь N_{cr} - критическая продольная сила, которая вычисляется по формуле:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 D}{l_0^2}$$

где l_0 - расчетная длина сжатого элемента. Жесткость D при нормальной температуре вычисляется согласно [4], Г.2 по формуле:

$$D = \frac{0.15 E_{bt} I_b}{\varphi_l (0.3 + \delta_e)} + 0.7 (E_s I_s + E I_{st})$$

Здесь $E_{bt} = 0.85 E_b$; I_b, I_s, I_{st} - моменты инерции бетонного сечения, сечения арматуры и сечения профиля относительно центральной оси сечения, $\delta_e = e_0 / h$ - относительный эксцентриситет продольной силы, h - высота сечения в плоскости изгиба. Коэффициент φ_l принимается равным 2.

При определении эксцентриситета e_0 учитывается случайный эксцентриситет e_a [4], 7.1.1.5. При расчете элемента статически определимой конструкции эксцентриситет e_0 принимается равным $M / N + e_a$, а при расчете элемента статически неопределимой конструкции – равным M / N , если $M / N \geq e_a$, и равным e_a , если $M / N < e_a$.

При расчете по огнестойкости модули упругости равны:

$$E_{bt} = \beta_b(T) E_b, E_{st} = \beta_s(T) E_s, E_t = \beta_{st}(T) E$$

где $\beta_b(T)$, $\beta_s(T)$, $\beta_{st}(T)$ - коэффициенты редукции модуля упругости бетона, арматуры и конструкционной стали, зависящие от температуры T . При неравномерном нагреве сечения $T = T(y, z)$ и, следовательно, модули упругости зависят от y, z . Выражение для жесткости записывается в виде:

$$D = \frac{0.15}{\varphi_l (0.3 + \delta_e)} 0.85 D_b + 0.7 (D_s + D_{st})$$

Сечение разбивается на малые элементы, в пределах которых температура принимается постоянной. Тогда величина D_b определяется как $D_b = \sum \beta_{b,i} E_b I_{b,i}$, где $\beta_{b,i} = \beta_b(T_i)$, $I_{b,i}$ - момент инерции площади малого элемента относительно оси изгиба. Величина D_s определяется как $D_s = \sum \beta_{s,i} E_s I_{s,i}$, где $\beta_{s,i} = \beta_s(T_i)$, $I_{s,i}$ - момент инерции площади сечения арматурного стержня относительно оси изгиба. Величина D_{st} определяется как $D_{st} = \beta_{st} E I$, где β_{st} - коэффициент редукции модуля упругости конструкционной стали, определенный для температуры профиля, $E I$ - жесткость сечения профиля при нормальной температуре.

Литература

1. СП 468.1325800.2019 «Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности».
2. СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения».
3. СП 16.13330.2017 «СНиП II-23-81* Стальные конструкции».
4. СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования».
5. ГОСТ 30247.0-94 Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования.
6. EN 1994-1-2: Eurocode 4: Part 1-2: General rules - Structural fire design.
7. DIN EN 1991-1-2 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Brandeinwirkungen auf Tragwerke. September 2003.

446 – Расчет по огнестойкости преднапряженной плиты



Программа предназначена для расчёта по огнестойкости сплошной или многопустотной преднапряженной плиты согласно СП 468.1325800.2019 [1] и СП 63.13330.2018 [2]. Температурное поле в сечении плиты при огневом воздействии определяется путем решения задачи нестационарной теплопроводности с учетом зависимости теплофизических характеристик бетона от температуры. Предельный изгибающий момент вычисляется на основе диаграмм деформирования сжатого бетона и арматуры/

1. Сечение

Рассматривается сечение сплошной или многопустотной плиты с ненапрягаемой и напрягаемой арматурой, расположенной у нижней поверхности плиты (рис.1).

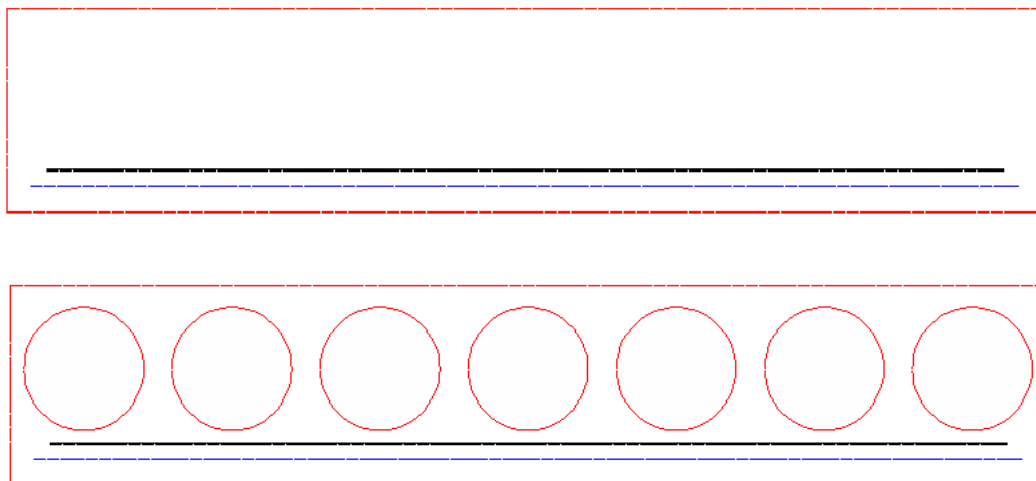


Рис. 1. Сечения плиты

Для каждого вида арматуры задается площадь арматуры и расстояние от нижней стороны сечения до центра тяжести арматуры. Допускается отсутствие ненапрягаемой или напрягаемой арматуры. Предполагается, что напрягаемая арматура располагается над ненапрягаемой арматурой.

Возможно задание смещения d центров круглых полостей от центра сечения плиты. При положительном значении d , полости смещаются вверх, а при отрицательном значении – вниз.

Напрягаемая арматура может быть стержневой, проволочной или канатной. Рассматривается натяжение арматуры на упоры. Потери предварительного напряжения могут определяться согласно [2] или задаваться при вводе данных.

2. Расчет плиты при нормальной температуре

Расчет плиты проводится на основе нелинейной деформационной модели [2]. Для сжатого бетона и арматуры обоих видов применяются двухлинейные диаграммы деформирования. Расчет включает определение напряжений в стадии предварительного обжатия и определение предельного изгибающего момента в стадии эксплуатации. При расчете выводятся изображения сжатой зоны и значения деформаций бетона и арматуры. На рис.2 дан пример изображения сжатой зоны при определении предельного изгибающего момента.

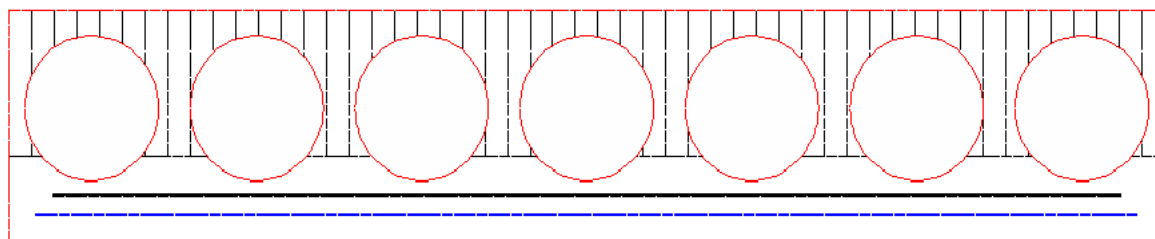


Рис. 2. Пример сжатой зоны при определении предельного изгибающего момента

3. Расчет плиты по огнестойкости

Огнестойкость плиты характеризуется периодом времени (в минутах) от начала пожара до момента возникновения предельного состояния плиты, при котором происходит потеря несущей способности.

Огневое воздействие характеризуется зависимостью температуры среды от времени, отсчитываемого от начала пожара. Согласно [3], при стандартном пожаре, принимается следующая зависимость температуры среды от времени:

$$T_0 = 20 + 345 \lg(8t + 1), \text{ где } t - \text{ время в мин.}$$

График зависимости $T_0(t)$ представлен на рис.3.

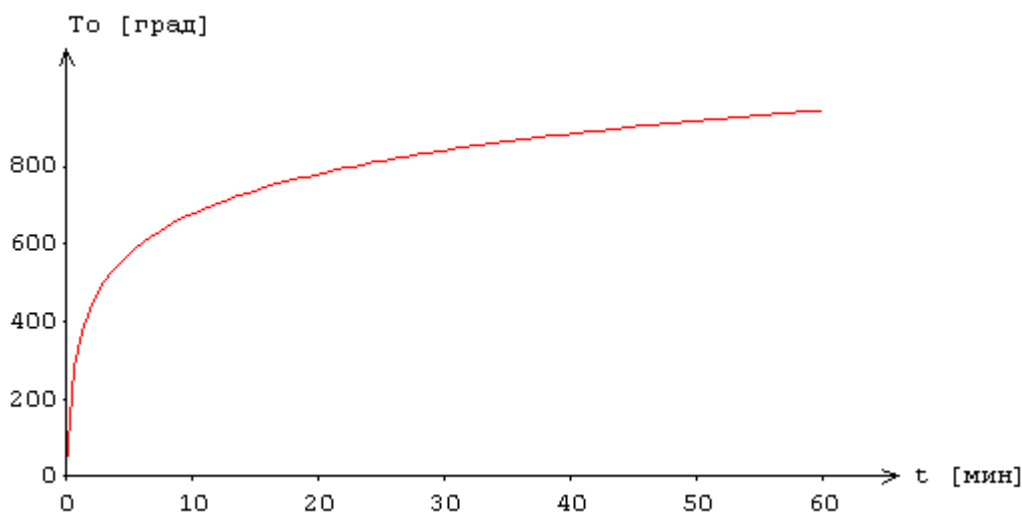


Рис.3. Зависимость температуры среды от времени

Для определения предела огнестойкости, необходимо рассчитать температурное поле в сечении плиты. Температура определяется на основе уравнения нестационарной теплопроводности с учетом зависимости теплофизических характеристик бетона от температуры. Температурная задача решается конечноразностным методом. Расчет температуры в сечении производится для дискретных моментов времени. Шаг по времени может приниматься равным 3мин, 6мин, 12мин.

Температура в сечении многопустотной плиты определяется для редуцированного сечения в виде тавра (рис.4) при нагреве нижней стороны. Ширина ребра тавра и толщина полки определяются по формулам $b_w = b - nD$, $t = (h - D)/2 + d$, где b, h - ширина и высота сечения плиты; D, n - диаметр и число полостей, d - смещение центров полостей.

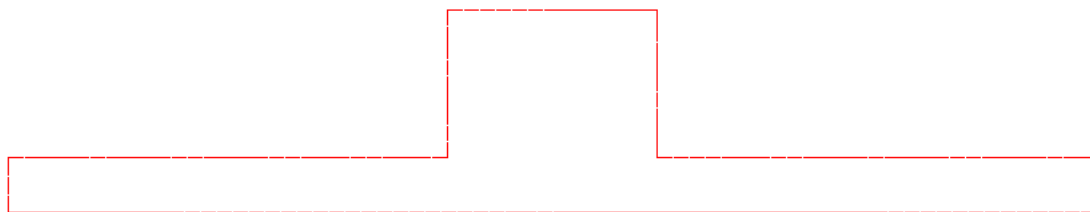


Рис.4.Пример редуцированного сечения многопустотной плиты при определении температуры

Потери предварительного напряжения при нагреве определяются согласно [1], 8.47.

При определении предельного изгибающего момента, применяется упрощенный метод согласно [1], 8.7. При этом рассматривается уменьшенное сечение плиты за вычетом слоя бетона, нагретого выше критической температуры, которая равна 500 °С для бетона на силикатном заполнителе и равна 600 °С для бетона на карбонатном заполнителе. Для бетона, температура которого не превышает критическую температуру, применяются характеристики ненагретого бетона. Расчетное сопротивление и модуль упругости арматуры при нагреве определяются по формулам [1]:

$$R_{snt} = R_{sn} \gamma_{st}$$

$$E_{st} = E_s \beta_s$$

Значения коэффициента условий работы арматуры γ_{st} и коэффициента редукции модуля упругости арматуры β_s принимаются по таблице 5.6 [1]. Предельная деформация арматуры ε_{s2} принимается равной 25 ‰ при $20^\circ\text{C} \leq T \leq 200^\circ\text{C}$ и равной 50 ‰ при $T \geq 500^\circ\text{C}$. При $200^\circ\text{C} < T < 500^\circ\text{C}$ предельная деформация ε_{s2} определяется интерполяцией.

В программе строится зависимость коэффициента запаса прочности $\gamma_u = M_{u,t} / M$ от времени, где $M_{u,t}$ - предельный изгибающий момент, M - изгибающий момент от нормативных постоянных и длительных нагрузок. Предел огнестойкости определяется по моменту времени, при котором $\gamma_u = 1$. На рис.5 представлен пример изменения коэффициента запаса прочности во времени.

В случае многопустотной плиты, рассматривается редуцированное сечение в виде двутавра или тавра (рис.6). Штриховыми линиями изображен контур исходного расчетного сечения при нормальной температуре. Глубина прогрева бетона a_t до критической температуры определяется при помощи графика температуры на оси редуцированного сечения (рис.7), полученного по результатам решения температурной задачи.

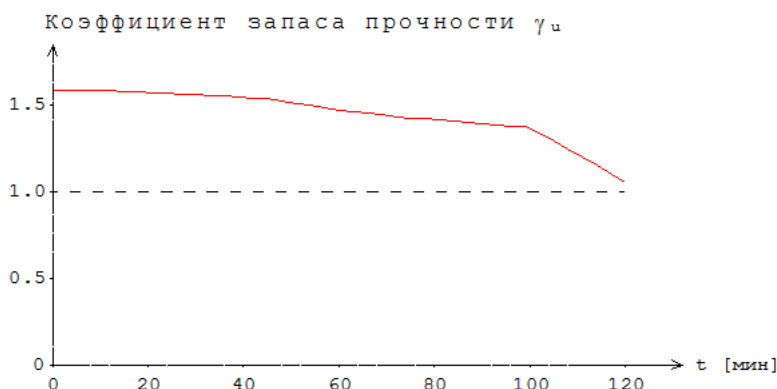


Рис.5 . Пример изменения коэффициента запаса прочности во времени

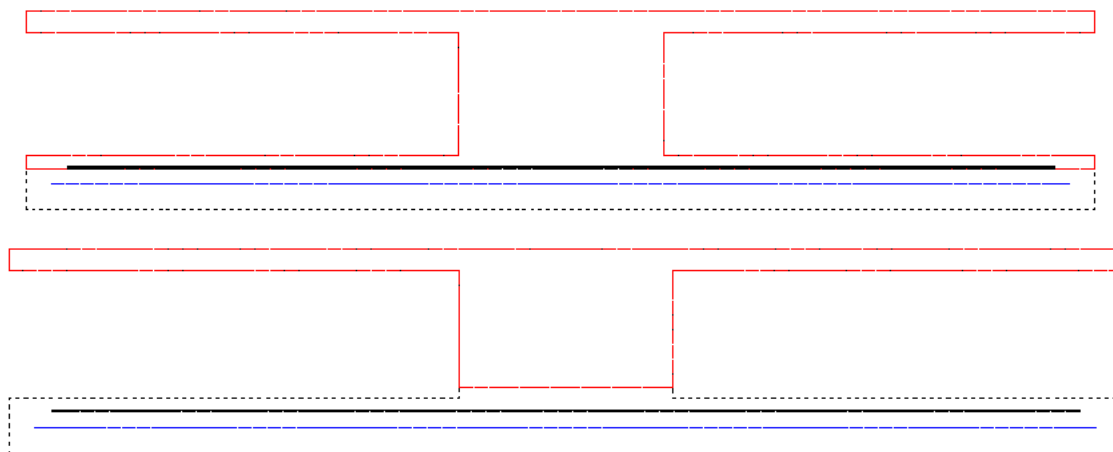


Рис.6. Примеры редуцированного сечения многопустотной плиты при определении предельного изгибающего момента

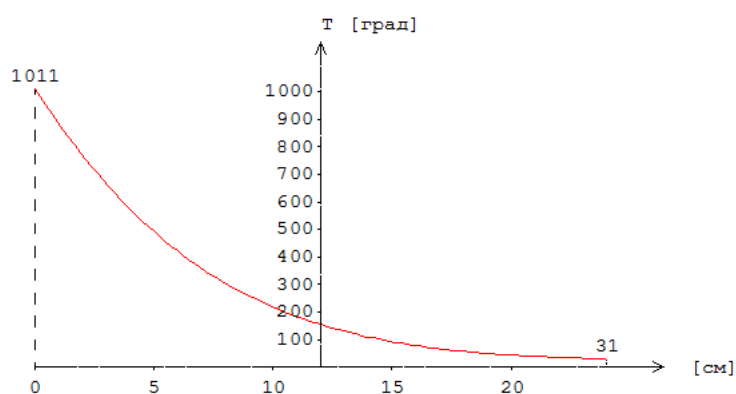


Рис.7. Пример графика температуры

При расчете предельного изгибающего момента, выводятся изображение сжатой зоны (рис.8) и значения деформаций бетона и арматуры.

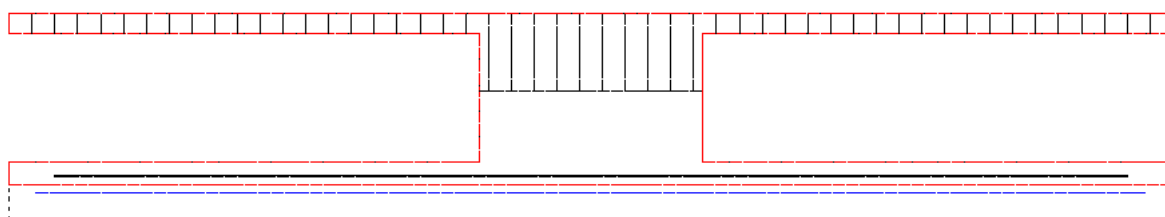


Рис.8. Пример сжатой зоны при определении предельного изгибающего момента

Литература

1. СП 468.1325800.2019 «Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности».
2. СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения».
3. ГОСТ 30247.0-94 Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования.

450 – Расчет по огнестойкости



Программа предназначена для расчёта по огнестойкости элементов железобетонных конструкций согласно СП 468.1325800.2019 [1] и СП 63.13330.2018 [2]. Температурное поле в сечении элемента при огневом воздействии определяется путем решения задачи нестационарной теплопроводности с учетом зависимости теплофизических характеристик бетона от температуры. Предельные усилия вычисляются на основе диаграмм деформирования сжатого бетона и арматуры.

1. Сечения

Для балки рассматриваются прямоугольные и тавровые сечения с различной верхней и нижней арматурой (рис.1). Применяются центральные оси координат y, z бетонного сечения.

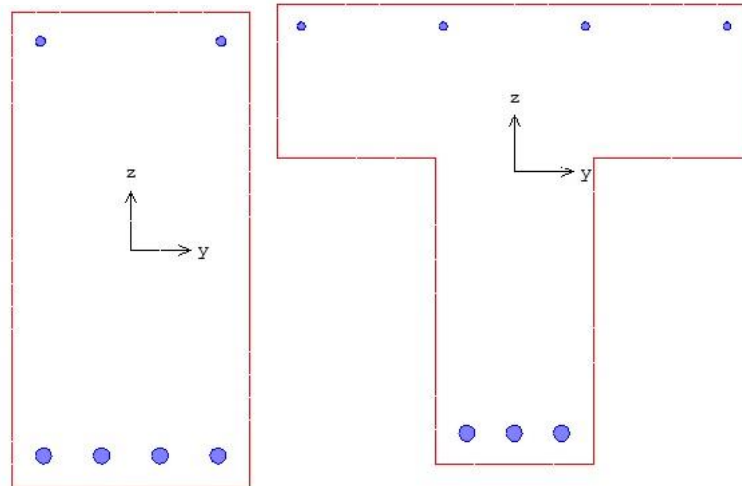


Рис.1 Сечения балки

Для колонны рассматриваются прямоугольные, круглые, уголкового и тавровые сечения (рис.2).

Для прямоугольного сечения предусмотрены следующие схемы армирования: 1) арматура располагается в углах сечения, 2) арматура располагается вдоль контура сечения, 3) арматура располагается произвольным образом.

При второй схеме армирования, стержни располагаются в углах и вдоль сторон сечения. В этом случае задаются числа промежуточных стержней, расположенных вдоль сторон сечения. Диаметры угловых и промежуточных стержней могут быть различными.

Если фактическое размещение арматурных стержней отличается от первой и второй схем армирования, то арматура считается произвольно расположенной и задается путем ввода рядов стержней. Для каждого ряда стержней задаются координаты начала и конца отрезка, на котором размещаются арматурные стержни. Для удобства ввода применяется система координат (Y, Z) с началом в левой точке нижней стороны сечения. Ось Y направляется вправо по нижней стороне сечения, а ось Z - вверх по левой стороне сечения. Задаются число стержней в ряду и диаметр стержней. При вводе одиночного стержня задается только первая пара координат.

В круглом сечении арматурные стержни равномерно распределяются вдоль окружности. Предусмотрены два варианта размещения стержней в зависимости от расположения первого стержня на оси y или на оси z .

Для уголкового сечения предусмотрены следующие схемы армирования: 1) арматура располагается в углах сечения, 2) арматура располагается вдоль контура сечения, 3) арматура располагается произвольным образом.

Для таврового сечения может быть задана верхняя и/или нижняя арматура, а также произвольно расположенные ряды арматурных стержней.

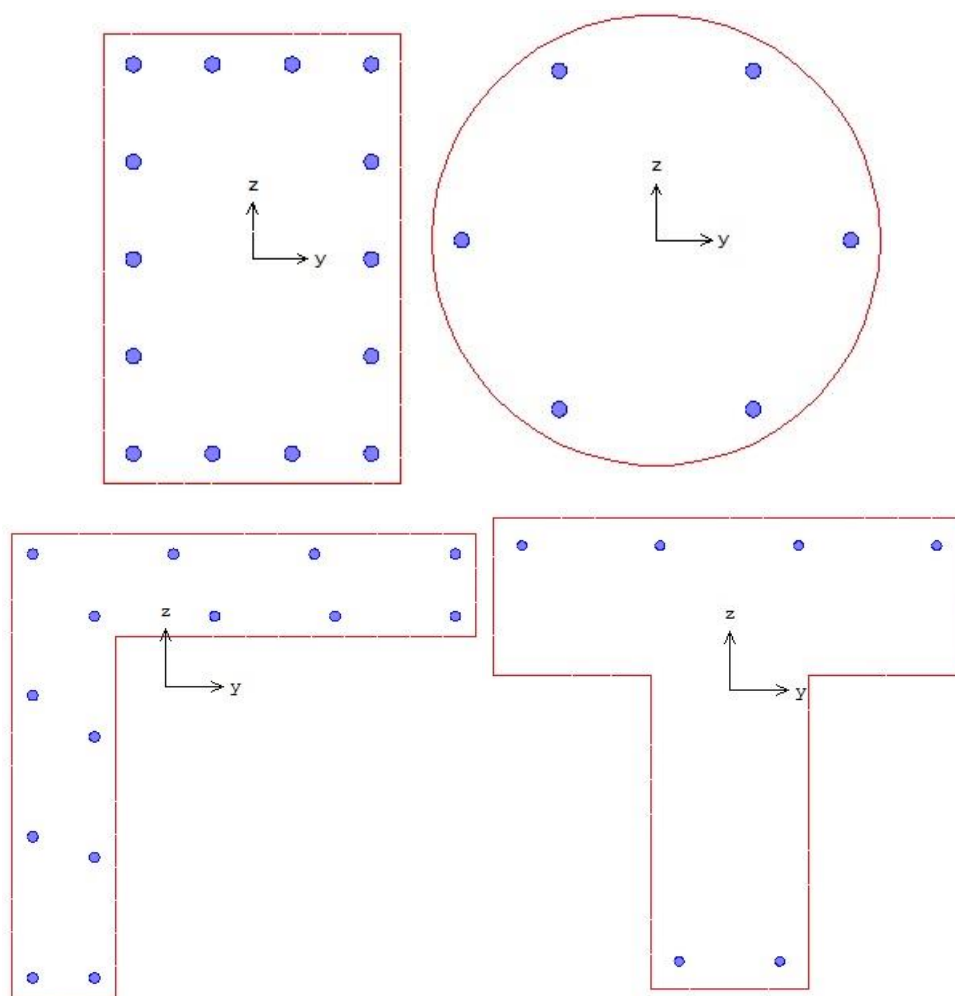


Рис. 2. Сечения колонны

В случае плиты или стены, рассматривается полоса шириной 1м с различной или одинаковой арматурой вдоль сторон сечения (рис.3, 4).

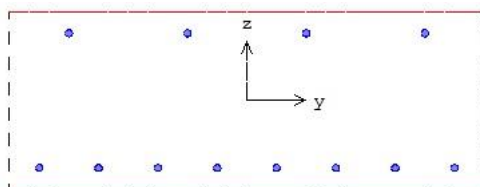


Рис. 3. Сечение плиты

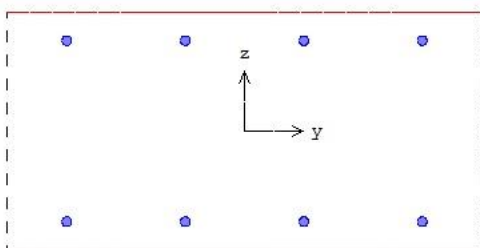


Рис. 4. Сечение стены

2. Усилия

Расчет по огнестойкости проводится для усилий от наиболее неблагоприятных сочетаний нормативных постоянных и длительных нагрузок.

Продольная сила N принимается положительной при сжатии. Положительные направления изгибающих моментов M_y, M_z показаны на рис.5. Изгибающий момент M_y является положительным, если при его действии сжатая зона возникает в верхней части сечения. Изгибающий момент M_z является положительным, если при его действии сжатая зона возникает в левой части сечения. При расчете плиты или стены задаются погонные усилия.

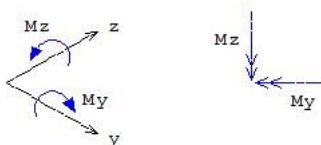


Рис.5. Положительные направления моментов

3. Материалы

Класс бетона и класс арматуры принимаются согласно [2]. Расчет проводится для бетонов до класса В55 включительно. Диаграммы деформирования бетона и арматуры при нормальной температуре приведены на рис. 6, 7. По горизонтальной оси откладывается значение деформации в промилле ($1\text{‰}=0.1\%=0.001$). Отрицательные значения соответствуют деформации сжатия.

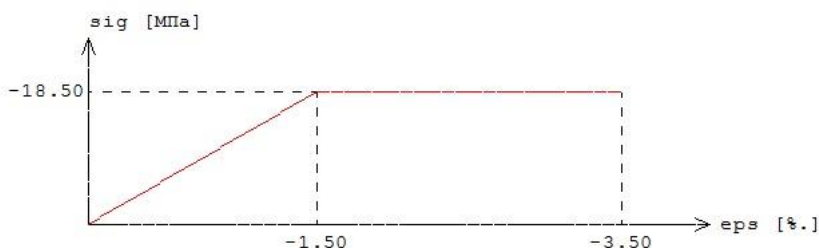


Рис.6. Диаграмма деформирования сжатого бетона В25 при нормальной температуре

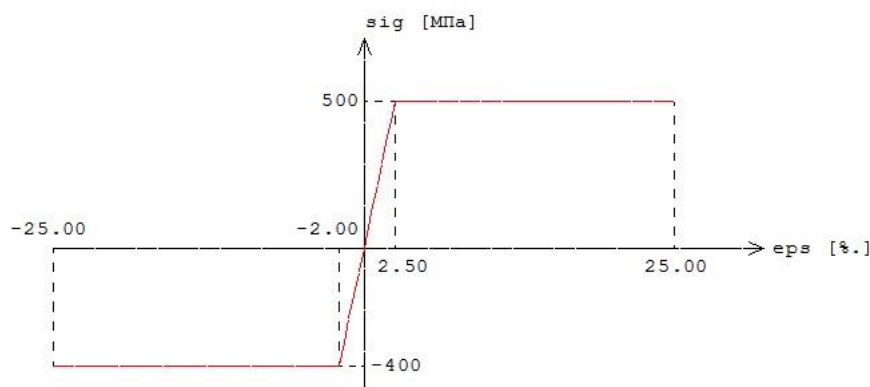


Рис.7. Диаграмма деформирования арматуры А500 при нормальной температуре

Расчетные сопротивления и модули упругости материалов при нагреве определяются по формулам [1].

$$R_{bnt} = R_{bn} \gamma_{bt}$$

$$E_{bt} = E_b \beta_b$$

$$R_{snt} = R_{sn} \gamma_{st}$$

$$E_{st} = E_s \beta_s$$

Значения коэффициента условий работы бетона γ_{bt} и коэффициента редукции модуля упругости бетона β_b принимаются по таблице 5.1 [1], параметры диаграммы для бетона $\varepsilon_{b1}, \varepsilon_{b2}$ - по таблице 5.5 [1]. Значения коэффициента условий работы арматуры γ_{st} и коэффициента редукции модуля упругости арматуры β_s принимаются по таблице 5.6 [1]. Предельная деформация арматуры ε_{s2} принимается равной 25‰ при $20^\circ\text{C} \leq T \leq 200^\circ\text{C}$ и равной 50‰ при $T \geq 500^\circ\text{C}$. При $200^\circ\text{C} < T < 500^\circ\text{C}$ предельная деформация ε_{s2} определяется интерполяцией.

В программе возможен табличный вывод коэффициентов для заданного вида заполнителя в бетоне и класса арматуры.

4. Расчет по огнестойкости

Огнестойкость элемента характеризуется периодом времени (в минутах) от начала пожара до момента возникновения предельного состояния элемента. Для несущих элементов предельным состоянием по огнестойкости является состояние, при котором происходит потеря несущей способности. Предельное состояние наступает тогда, когда предельные усилия становятся равными расчетным усилиям. В программе строится зависимость коэффициента запаса прочности γ_u от времени. Предел огнестойкости определяется по моменту времени, при котором $\gamma_u = 1$.

Экспериментально установлено, что разрушение железобетонного элемента при огневом воздействии происходит аналогично разрушению при нормальной температуре. Предельные усилия при огневом воздействии определяются на основе диаграмм деформирования сжатого бетона и арматуры при тех же предположениях, что и при нормальной температуре. Основными предположениями являются следующие: деформации распределяются по линейному закону, напряжения в растянутом бетоне пренебрежимо малы. При определении предельных усилий при огневом воздействии учитывается зависимость прочностных и деформационных характеристик материалов от температуры.

4.1 Определение температурного поля

Для определения предела огнестойкости необходимо рассчитать температурное поле в сечении элемента от огневого воздействия. Температурное поле $T(y, z, t)$ определяется на основе уравнения нестационарной теплопроводности:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = c \rho \frac{\partial T}{\partial t}$$

Здесь λ - коэффициент теплопроводности, c - удельная теплоемкость, ρ - плотность материала. При расчете температуры в сечении элемента не учитывается наличие арматуры.

Коэффициент теплопроводности бетона в $[\text{Вт}/(\text{м}^\circ\text{C})]$ определяется по следующим формулам (см. [1], 6.3):

$$\text{ - для бетона на силикатном заполнителе } \lambda = 1.2 - 0.00035T ;$$

- для бетона на карбонатном заполнителе $\lambda = 1.14 - 0.00055T$.

Удельная теплоемкость бетона в $[\text{Дж}/(\text{кг}^\circ\text{C})]$ на силикатном или карбонатном заполнителе равна $c = 710 + 0.83T$.

В программе предусмотрен учет влажности бетона согласно [5], при котором зависимость удельной теплоемкости от температуры характеризуется пиковым значением при 115°C , равным 1470 и 2020 при влажности 1.5% и 3% соответственно.

Огневое воздействие характеризуется зависимостью температуры среды от времени, отсчитываемого от начала пожара. Согласно [3], при стандартном пожаре принимается следующая зависимость температуры среды от времени:

$$T_0 = 20 + 345 \lg(8t + 1), \text{ где } t - \text{ время в мин.}$$

График зависимости $T_0(t)$ представлен на рис.8.

В программе предусмотрена возможность расчета для другой зависимости температуры среды от времени. В этом случае требуется ввести значения T_{0i} в моменты времени t_i при условии:

$$t_i > t_{i-1}.$$

Предусмотрены два вида граничных условий на нагреваемых сторонах сечения. Условие первого вида представляет собой равенство теплового потока от границы вглубь сечения и теплового потока к границе от среды. Условие второго вида представляет собой равенство температуры на поверхности элемента и температуры среды.

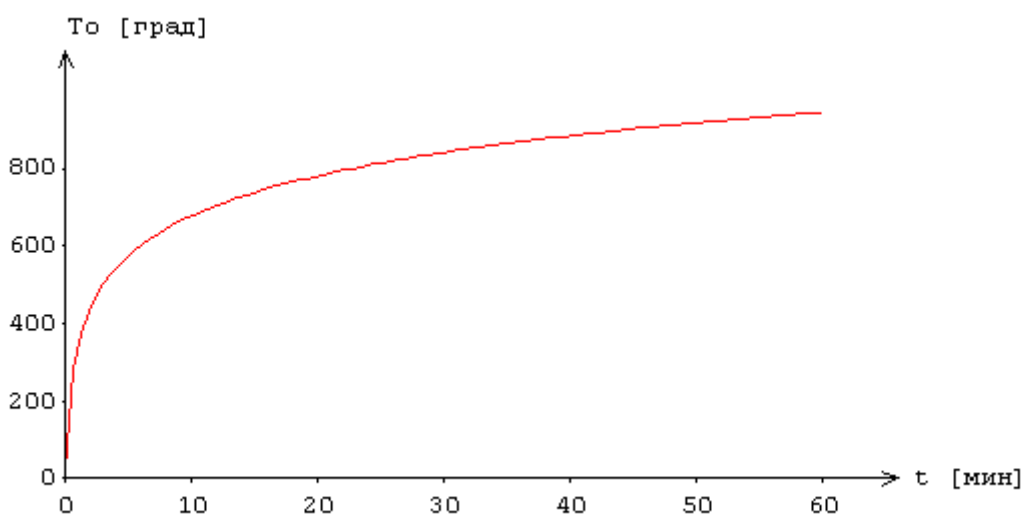


Рис.8. Зависимость температуры среды от времени

Тепловой поток к контуру сечения от среды равен (см.[4],6.4 и [5],3.1):

$$Q = Q_c + Q_r$$

$$Q_c = \alpha_c (T_0 - T)$$

$$Q_r = 5.67 \varepsilon [(0.01T_0 + 2.73)^4 - (0.01T + 2.73)^4]$$

Здесь Q_c - конвективный тепловой поток, Q_r - лучистый тепловой поток, T_0 - температура среды, T - температура на контуре сечения. Тепловой поток от контура вглубь сечения равен:

$$Q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n}$$

где $\frac{\partial T}{\partial n}$ - производная по внутренней нормали к контуру сечения. Согласно [4], принимается $\alpha_c = 29 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$, $\varepsilon = 0.56$. На ненагреваемых сторонах ставится аналогичное условие при $\alpha_c = 1.5\sqrt{T-20} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$, $\varepsilon = 0.63$.

Температурная задача решается конечноразностным методом. Производная $\frac{\partial T}{\partial t}$ заменяется разностным отношением:

$$\frac{T(y, z, t + \Delta t) - T(y, z, t)}{\Delta t} \quad \text{где } \Delta t - \text{шаг по времени.}$$

Расчет температурного поля в сечении производится для дискретных моментов времени. Шаг по времени может приниматься равным 3мин, 6мин, 12мин или задаваться другим значением в пределах от 1мин до 30мин. В общем случае, при увеличении шага уменьшается объем вычислений, однако может снижаться точность результата.

Производные по координатам также заменяются разностными отношениями. После определения температуры на конечноразностной сетке температура в произвольной точке сечения определяется интерполяцией. В качестве примера на рис.9 приведены изотермы, полученные при трехстороннем нагреве прямоугольного сечения и всестороннем нагреве уголкового сечения.

При вводе исходных данных программы могут быть заданы управляющие параметры расчета температурного поля: номинальный шаг сетки s и максимальное число точек сетки в одном направлении $N_{\max}$. Если значение s не задано, то принимается $s = 10 \text{ мм}$. Если значение $N_{\max}$ не задано, то принимается $N_{\max} = 60$. Аналогичные параметры могут быть заданы для управления разбиением сжатой зоны сечения на малые элементы при определении предельных усилий.

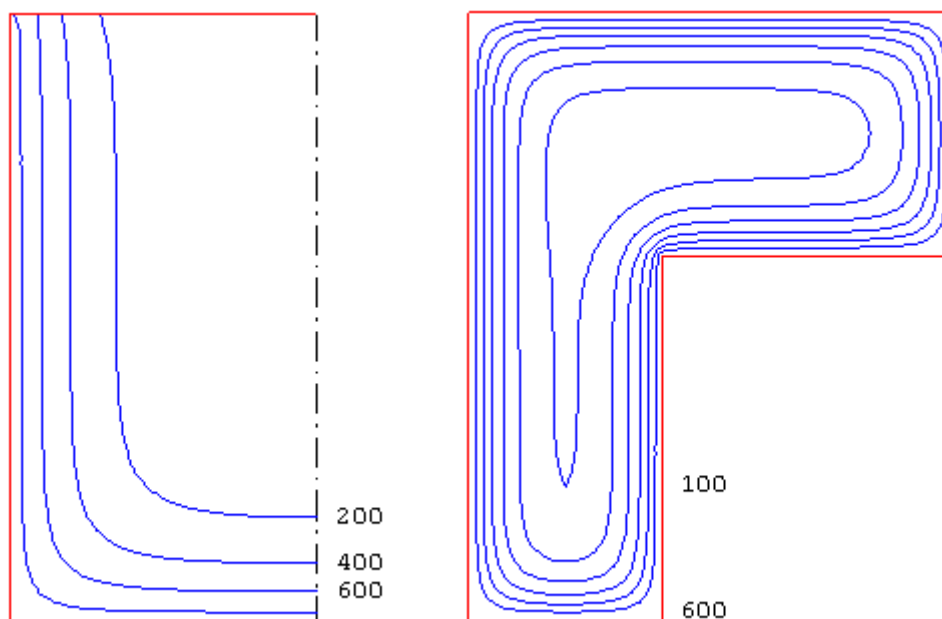


Рис.9. Изотермы

В программе предусмотрен вывод температуры в заданных точках, определяемых в системе координат (Y, Z) с началом в левой точке нижней стороны сечения. При этом ось Y направляется

вправо по нижней стороне сечения, а ось Z - вверх либо по левой стороне прямоугольного или углового сечения, либо по левой стороне ребра таврового сечения. В случае круглого сечения, температура выводится для точек, лежащих на оси Y . В случае сечения плиты или стены, задаются расстояния от нижней стороны до точек, для которых требуется вывод температуры.

4.2 Определение предельных усилий

Предельные усилия при огневом воздействии определяются на основе диаграмм деформирования сжатого бетона и арматуры с учетом зависимости характеристик материалов от температуры согласно [1]. Нормативные сопротивления сжатого бетона и арматуры при нормальной температуре принимаются согласно [2].

Предельные усилия принимаются пропорциональными расчетным усилиям: $N_u = \gamma_u N$, $M_{yu} = \gamma_u M_y$, $M_{zu} = \gamma_u M_z$. Прочность сечения обеспечена, если коэффициент γ_u не меньше единицы. Предполагается, что деформация в сечении распределяется по линейному закону $\varepsilon(y, z) = \varepsilon_0 + \kappa_y y + \kappa_z z$, где κ_y, κ_z - кривизны. Предельные усилия определяются на основе следующих уравнений:

$$\begin{aligned} \int_{A_b} \sigma_b dA + \int_{A_s} \sigma_s dA &= \gamma_u N \\ \int_{A_b} \sigma_b z dA + \int_{A_s} \sigma_s z dA &= \gamma_u M_y \\ \int_{A_b} \sigma_b y dA + \int_{A_s} \sigma_s y dA &= -\gamma_u M_z \end{aligned}$$

Здесь $\sigma_b = f_b(\varepsilon, T)$ - напряжение в сжатом бетоне, $\sigma_s = f_s(\varepsilon, T)$ - напряжение в арматуре, $T = T(y, z, t)$ - температура, A_b - сжатая зона бетонного сечения, A_s - сечение арматуры.

Для вычисления интегралов по A_b производится разбиение сжатой зоны сечения на малые элементы, в пределах которых напряжение принимается постоянным. Определение интегралов сводится к вычислению конечных сумм. При вычислении интегралов по A_s принимается, что площадь сечения арматурного стержня сосредоточена в его центре. Температура арматурного стержня принимается равной температуре в точке, совпадающей с центром сечения стержня.

Распределение деформации в предельном состоянии $\varepsilon_u(y, z)$ отыскивается из ограничения деформации сжатого бетона значением ε_{b2} и из ограничения деформации растянутой арматуры значением ε_{s2} . Для каждого положения нейтральной линии однозначно определяется распределение деформации в предельном состоянии. В результате решения системы трех нелинейных уравнений определяется положение нейтральной линии и коэффициент запаса прочности γ_u . На рис.10 приведен пример зависимости коэффициента γ_u от времени при стандартном пожаре.

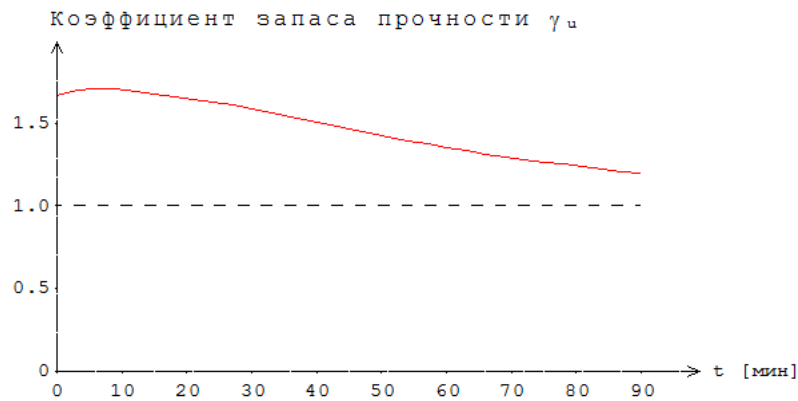


Рис.10. Пример зависимости коэффициента γ_u от времени

В программе предусмотрен вывод результатов расчета предельных усилий для предела огнестойкости. Помимо предельных усилий, выводятся кривизны, максимальные и минимальные (в алгебраическом смысле) деформации бетона и арматуры. Если предельная деформация бетона достигается в точке, лежащей внутри сжатой зоны, то выводятся координаты этой точки, температура T и предельное значение деформации $\varepsilon_{b2}(T)$. В случае, когда нейтральная линия пересекает сечение элемента, выводится изображение сжатой зоны сечения (рис.11).

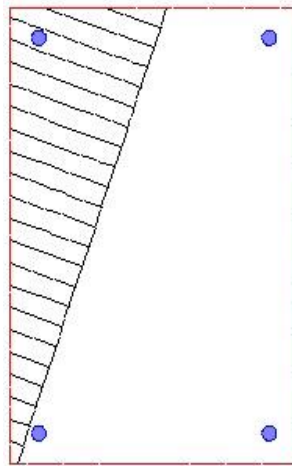


Рис.11. Пример изображения сжатой зоны сечения

4.3 Учет влияния прогиба

При учете влияния прогиба сжатого элемента (колонны или стены) величина расчетного момента определяется путем умножения изгибающего момента M , найденного на основе недеформированной схемы, на повышающий коэффициент

$$\eta = \frac{1}{1 - \frac{N}{N_{cr}}}$$

Здесь N_{cr} - критическая продольная сила, которая вычисляется по формуле:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 D}{l_0^2}$$

где l_0 - расчетная длина сжатого элемента. Жесткость D при нормальной температуре вычисляется согласно [2] по формуле:

$$D = \frac{0.15E_b I_b}{\varphi_l(0.3 + \delta_e)} + 0.7E_s I_s$$

Здесь E_b, E_s - модули упругости бетона и арматуры; I_b, I_s - моменты инерции бетонного сечения и сечения арматуры относительно центральной оси сечения, $\delta_e = e_0 / h$ - относительный эксцентриситет продольной силы, h - высота сечения в плоскости изгиба. Коэффициент φ_l принимается равным 2.

При определении эксцентриситета e_0 , учитывается случайный эксцентриситет e_a [2]. При расчете элемента статически определимой конструкции, эксцентриситет e_0 принимается равным $M/N + e_a$, а при расчете элемента статически неопределимой конструкции – равным M/N , если $M/N \geq e_a$, и равным e_a , если $M/N < e_a$.

При расчете по огнестойкости модули упругости равны:

$$E_{bt} = \beta_b(T)E_b, E_{st} = \beta_s(T)E_s$$

где $\beta_b(T), \beta_s(T)$ - коэффициенты редукции модуля упругости бетона и арматуры, зависящие от температуры T . При неравномерном нагреве сечения $T = T(y, z)$ и, следовательно, модули упругости зависят от y, z .

В программе возможен выбор одного из двух методов определения жесткости D при нагреве элемента. По первому методу выражение для жесткости представляется в виде:

$$D = \frac{0.15}{\varphi_l(0.3 + \delta_e)} D_b + 0.7D_s$$

Сечение разбивается на малые элементы, в пределах которых температура принимается постоянной. Тогда величина D_b определяется как $D_b = \sum \beta_{b,i} E_b I_{b,i}$, где $\beta_{b,i} = \beta_b(T_i)$, $I_{b,i}$ - момент инерции площади малого элемента относительно оси изгиба. Величина D_s определяется как $D_s = \sum \beta_{s,i} E_s I_{s,i}$, где $\beta_{s,i} = \beta_s(T_i)$, $I_{s,i}$ - момент инерции площади сечения арматурного стержня относительно оси изгиба.

По второму методу жесткость определяется по формуле:

$$D = \frac{0.15E_{bt} I_b}{\varphi_l(0.3 + \delta_e)} + 0.7E_{st} I_s$$

$$E_{bt} = \beta_b(T_{b,cp})E_b$$

$$E_{st} = \beta_s(T_{s,cp})E_s$$

Здесь $T_{b,cp}$ - среднее значение температуры бетона, $T_{s,cp}$ - средняя температура арматуры.

При нагреве одной стороны стены, возникают неравномерные температурные деформации, что приводит к прогибу в направлении к нагреваемой стороне. Значение температурного прогиба определяется согласно [1], (8.29) по формуле:

$$e_t = (\alpha_{st}T_s - \alpha_{bt}T_b) \frac{l_0^2}{8h_0}$$

Здесь T_s - температура арматуры у нагреваемой стороны, T_b - температура бетона на ненагреваемой стороне, $\alpha_{st} = \alpha_{st}(T_s)$ - коэффициент линейного расширения арматуры, $\alpha_{bt} = \alpha_{bt}(T_b)$ - коэффициент линейного расширения бетона, h_0 - рабочая высота сечения.

При центральном сжатии стены, знак случайного эксцентриситета e_a выбирается с учетом знака температурного прогиба. При внецентренном сжатии стены, температурный прогиб учитывается в том случае, когда его учет приводит к увеличению расчетного момента.

Литература

1. СП 468.1325800.2019 «Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности».
2. СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения».
3. ГОСТ 30247.0-94: Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования.
4. МДС 21-2.2000: Методические рекомендации по расчету огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций / ГУП «НИИЖБ», ФГУП ЦПП. – М., 2000.
5. DIN EN 1991-1-2: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Brandeinwirkungen auf Tragwerke. September 2003.

451 – Расчет по огнестойкости (сталежелезобетонное сечение)



Программа предназначена для расчёта по огнестойкости элементов сталежелезобетонных конструкций согласно СП 468.1325800.2019 [1], СП 63.13330.2018 [2], СП 16.13330.2017 [3], СП 266.1325800.2016 [4]. Температурное поле в бетонном сечении элемента при огневом воздействии определяется путем решения задачи нестационарной теплопроводности с учетом зависимости теплофизических характеристик бетона от температуры. Предельные усилия вычисляются на основе диаграмм деформирования сжатого бетона, арматуры и конструкционной стали.

1. Сечения

Рассматриваются железобетонные элементы прямоугольного сечения с жесткой арматурой (рис.1). Применяются центральные оси координат y, z бетонного сечения.

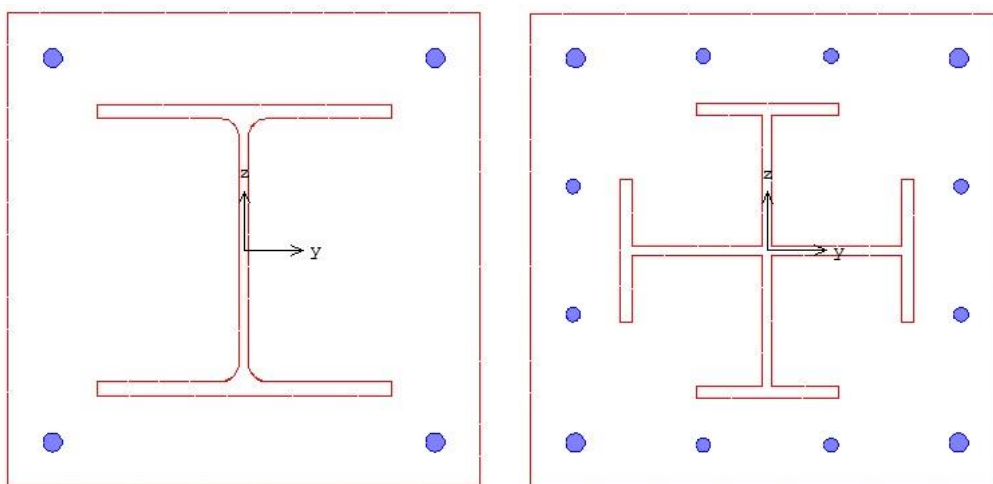


Рис. 1. Сечения с жесткой арматурой

Предусмотрены следующие схемы армирования: 1) арматура располагается в углах сечения, 2) арматура располагается вдоль контура сечения. При второй схеме армирования, стержни располагаются в углах и вдоль сторон сечения. В этом случае, задаются числа промежуточных стержней, расположенных вдоль сторон сечения. Диаметры угловых и промежуточных стержней могут быть различными.

В случае сечения первого вида (см. рис.1), двутавр может выбираться из сортамента прокатных двутавров или может задаваться сварным. В случае сечения второго вида, жесткая арматура рассматривается как профиль из четырех тавров.

2. Усилия

Расчет по огнестойкости проводится для усилий от наиболее неблагоприятных сочетаний нормативных постоянных и длительных нагрузок. Продольная сила N принимается положительной при сжатии. Положительные направления изгибающих моментов M_y, M_z показаны на рис.2. Изгибающий момент M_y является положительным, если при его действии сжатая зона возникает в верхней части сечения. Изгибающий момент M_z является положительным, если при его действии сжатая зона возникает в левой части сечения.

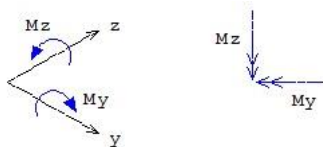


Рис.2. Положительные направления моментов

3. Материалы

Класс бетона и класс арматуры принимаются согласно [2]. Расчет проводится для бетонов до класса В55 включительно. Диаграммы деформирования бетона и арматуры при нормальной температуре приведены на рис. 3, 4.

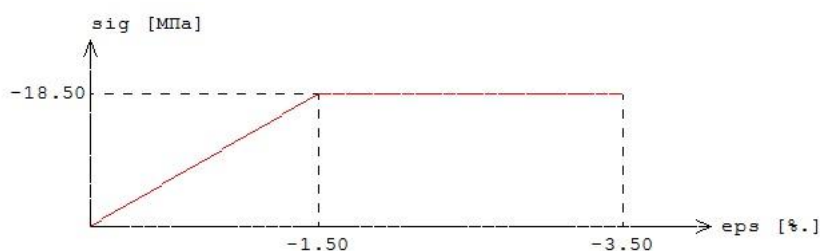


Рис.3. Диаграмма деформирования сжатого бетона В25 при нормальной температуре

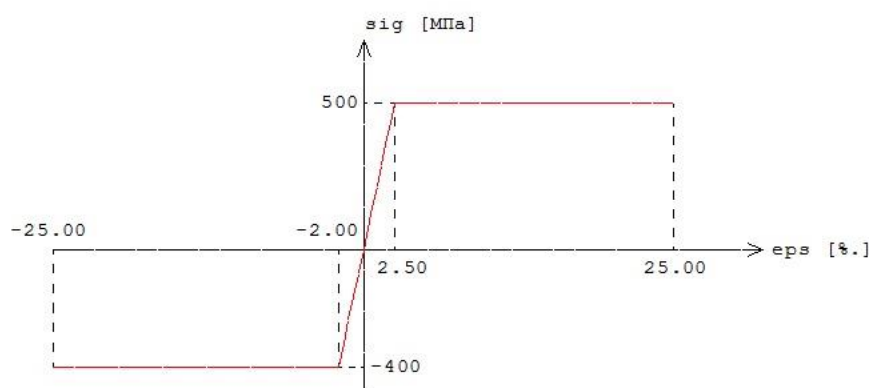


Рис.4. Диаграмма деформирования арматуры А500 при нормальной температуре

Расчетные сопротивления и модули упругости материалов при нагреве определяются по формулам [1]:

$$R_{bnt} = R_{bn} \gamma_{bt}$$

$$E_{bt} = E_b \beta_b$$

$$R_{snt} = R_{sn} \gamma_{st}$$

$$E_{st} = E_s \beta_s$$

Значения коэффициента условий работы бетона γ_{bt} и коэффициента редукции модуля упругости бетона β_b принимаются по таблице 5.1 [1], параметры диаграммы для бетона ε_{b1} , ε_{b2} - по таблице 5.5 [1]. Значения коэффициента условий работы арматуры γ_{st} и коэффициента редукции модуля упругости арматуры β_s принимаются по таблице 5.6 [1].

Класс конструкционной стали принимается согласно [3]. Диаграмма деформирования стали при нормальной температуре приведена на рис.5.

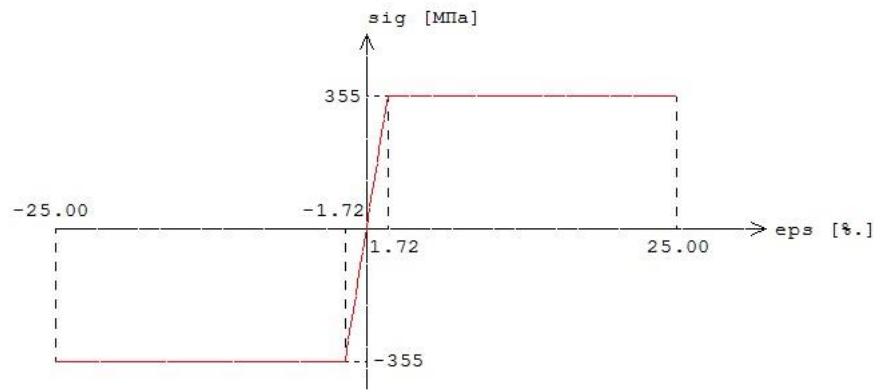


Рис.5. Диаграмма деформирования стали С375 при нормальной температуре

Расчетное сопротивление и модуль упругости стали при нагреве определяются по формулам:

$$R_{ynt} = R_{yn} \gamma_{st}$$

$$E_t = E \beta_{st}$$

Значения коэффициента условий работы стали γ_{st} и коэффициента редукции модуля упругости стали β_{st} принимаются по таблице 3.2 [6] (рис.6).

Коэффициент условий работы стали

№	T [°C]	γ_{st}	№	T [°C]	γ_{st}	№	T [°C]	γ_{st}
1	100	1.00	2	200	1.00	3	300	1.00
4	400	1.00	5	500	0.78	6	600	0.47
7	700	0.23	8	800	0.11	9	900	0.06
10	1000	0.04	11	1100	0.02	12	1200	0.00

Коэффициент редукции модуля упругости стали

№	T [°C]	β_{st}	№	T [°C]	β_{st}	№	T [°C]	β_{st}
1	100	1.00	2	200	0.90	3	300	0.80
4	400	0.70	5	500	0.60	6	600	0.31
7	700	0.13	8	800	0.09	9	900	0.07
10	1000	0.04	11	1100	0.02	12	1200	0.00

Рис.6. Значения γ_{st} , β_{st}

4. Расчет по огнестойкости

Огнестойкость элемента характеризуется периодом времени (в минутах) от начала пожара до момента возникновения предельного состояния элемента. Для несущих элементов предельным состоянием по огнестойкости является состояние, при котором происходит потеря несущей способности. Предельное состояние наступает тогда, когда предельные усилия становятся равными расчетным усилиям. В программе строится зависимость коэффициента запаса прочности γ_u от времени. Предел огнестойкости определяется по моменту времени, при котором $\gamma_u = 1$.

Экспериментально установлено, что разрушение железобетонного элемента при огневом воздействии происходит аналогично разрушению при нормальной температуре. Предельные усилия при огневом воздействии определяются на основе диаграмм деформирования сжатого бетона и арматуры при тех же предположениях, что и при нормальной температуре. Основными предположениями являются следующие: деформации распределяются по линейному закону, напряжения в растянутом бетоне пренебрежимо малы. При определении предельных усилий при

огневом воздействии учитывается зависимость прочностных и деформационных характеристик материалов от температуры.

4.1 Определение температурного поля

Для определения предела огнестойкости, необходимо рассчитать температурное поле в сечении элемента от огневого воздействия. Температурное поле $T(y, z, t)$ определяется на основе уравнения нестационарной теплопроводности:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = c \rho \frac{\partial T}{\partial t}$$

Здесь λ - коэффициент теплопроводности, c - удельная теплоемкость, ρ - плотность материала. При расчете температуры в сечении элемента не учитывается наличие арматуры.

Коэффициент теплопроводности бетона в $[\text{Вт}/(\text{м}^0 \text{С})]$ определяется по следующим формулам (см. [1], 6.3):

- для бетона на силикатном заполнителе $\lambda = 1.2 - 0.00035T$;
- для бетона на карбонатном заполнителе $\lambda = 1.14 - 0.00055T$.

Удельная теплоемкость бетона в $[\text{Дж}/(\text{кг}^0 \text{С})]$ на силикатном или карбонатном заполнителе равна $c = 710 + 0.83T$. В программе предусмотрен учет влажности бетона согласно [7], при котором зависимость удельной теплоемкости от температуры характеризуется пиковым значением при 115^0С , равным 1470 и 2020 при влажности 1.5% и 3% соответственно.

Огневое воздействие характеризуется зависимостью температуры среды от времени, отсчитываемого от начала пожара. Согласно [5], при стандартном пожаре принимается следующая зависимость температуры среды от времени:

$$T_0 = 20 + 345 \lg(8t + 1), \text{ где } t - \text{ время в мин.}$$

График зависимости $T_0(t)$ представлен на рис.7.

На сторонах сечения ставится условие равенства теплового потока от границы вглубь сечения и теплового потока к границе от среды.

Температурная задача решается конечноразностным методом. Производная $\frac{\partial T}{\partial t}$ заменяется разностным отношением

$$\frac{T(y, z, t + \Delta t) - T(y, z, t)}{\Delta t}$$

где Δt - шаг по времени. Расчет температурного поля в сечении производится для дискретных моментов времени. Шаг по времени может приниматься равным 3мин, 6мин, 12мин или задаваться другим значением в пределах от 1мин до 30мин. В общем случае, при увеличении шага, уменьшается объем вычислений, однако может снижаться точность результата.

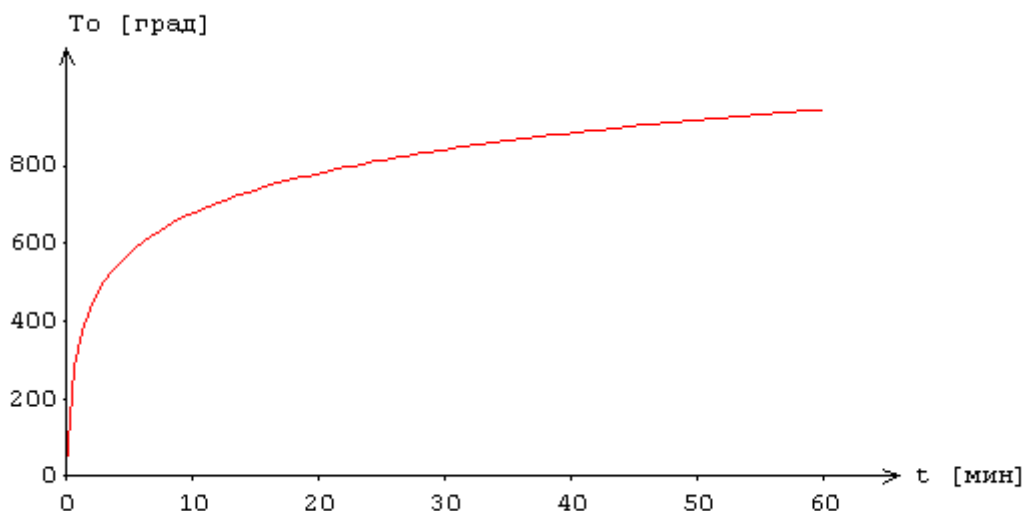


Рис.7. Зависимость температуры среды от времени

После определения температуры на конечноразностной сетке температура в произвольной точке сечения определяется интерполяцией. В качестве примера на рис.8 приведены изотермы, полученные при всестороннем нагреве.

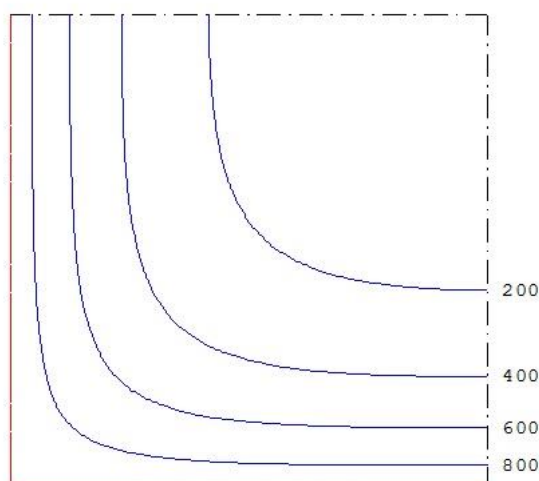


Рис.8. Изотермы

При вводе исходных данных программы могут быть заданы управляющие параметры расчета температурного поля: номинальный шаг сетки s и максимальное число точек сетки в одном направлении $N_{\max}$. Если значение s не задано, то принимается $s = 10$ мм. Если значение $N_{\max}$ не задано, то принимается $N_{\max} = 60$. Аналогичные параметры могут быть заданы для управления разбиением сжатой зоны сечения на малые элементы при определении предельных усилий.

В программе предусмотрен вывод температуры в заданных точках, определяемых в системе координат (Y, Z) с началом в левой точке нижней стороны сечения. При этом ось Y направляется вправо по нижней стороне сечения, а ось Z - вверх по левой стороне сечения.

4.2 Определение предельных усилий

Предельные усилия принимаются пропорциональными расчетным усилиям: $N_u = \gamma_u N$, $M_{yu} = \gamma_u M_y$, $M_{zu} = \gamma_u M_z$. Прочность сечения обеспечена, если коэффициент γ_u не меньше единицы. Предполагается, что деформации в сечении распределяются по линейному закону $\varepsilon(y, z) = \varepsilon_0 + \kappa_y y + \kappa_z z$, где κ_y, κ_z - кривизны. Предельные усилия определяются на основе следующих уравнений:

$$\begin{aligned} \int_{A_b} \sigma_b dA + \int_{A_s} \sigma_s dA + \int_{A_p} \sigma_p dA &= \gamma_u N \\ \int_{A_b} \sigma_b z dA + \int_{A_s} \sigma_s z dA + \int_{A_p} \sigma_p z dA &= \gamma_u M_y \\ \int_{A_b} \sigma_b y dA + \int_{A_s} \sigma_s y dA + \int_{A_p} \sigma_p y dA &= -\gamma_u M_z \end{aligned}$$

Здесь $\sigma_b = f_b(\varepsilon, T)$ - напряжение в сжатом бетоне, $\sigma_s = f_s(\varepsilon, T)$ - напряжение в гибкой арматуре, $\sigma_p = f_p(\varepsilon, T)$ - напряжение в жесткой арматуре, $T = T(y, z, t)$ - температура, A_b - сжатая зона бетонного сечения, A_s - сечение гибкой арматуры, A_p - сечение жесткой арматуры.

Для вычисления интегралов по A_b производится разбиение сжатой зоны сечения на малые элементы, в пределах которых напряжение принимается постоянным. Определение интегралов сводится к вычислению конечных сумм. При вычислении интегралов по A_s принимается, что площадь сечения арматурного стержня сосредоточена в его центре. Температура арматурного стержня принимается равной температуре в точке, совпадающей с центром сечения стержня. Вычисление интегралов по A_p производится как для полигонального контура. Температура жесткой арматуры принимается равной наибольшей температуре на контуре профиля.

Распределение деформации в предельном состоянии $\varepsilon_u(y, z)$ отыскивается из ограничения деформации сжатого бетона значением ε_{b2} , из ограничения деформации растянутой гибкой арматуры значением ε_{s2} , из ограничения деформации жесткой арматуры значением $2.5\% = 25$ промилле. Для каждого положения нейтральной линии однозначно определяется распределение деформации в предельном состоянии. В результате решения системы трех нелинейных уравнений определяется положение нейтральной линии и коэффициент запаса прочности γ_u . На рис.9 приведен пример зависимости коэффициента γ_u от времени при стандартном пожаре.

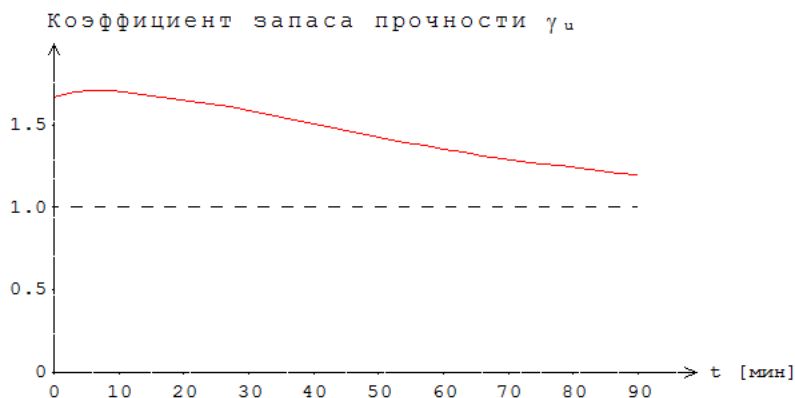


Рис.9. Пример зависимости коэффициента γ_u от времени

В программе предусмотрен вывод результатов расчета предельных усилий для предела огнестойкости. Помимо предельных усилий выводятся кривизны, максимальные и минимальные (в алгебраическом смысле) деформации бетона, арматуры и профиля. Если предельная деформация бетона достигается в точке, лежащей внутри сжатой зоны, то выводятся координаты этой точки, температура T и предельное значение деформации ε_{b2} . В случае, когда нейтральная линия пересекает сечение элемента, выводится изображение сжатой зоны сечения (рис.10).

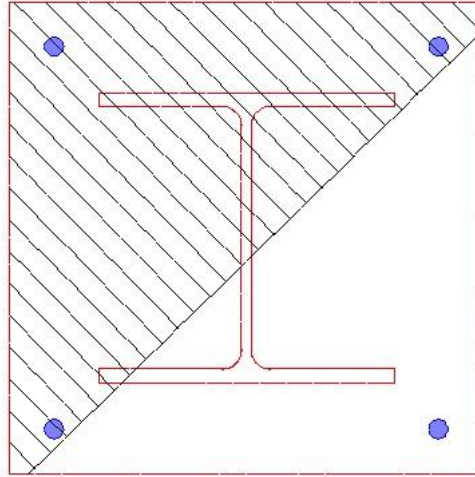


Рис.10. Пример изображения сжатой зоны сечения

4.3 Учет влияния прогиба

При учете влияния прогиба сжатого элемента, величина расчетного момента определяется путем умножения изгибающего момента M , найденного на основе недеформированной схемы, на повышающий коэффициент

$$\eta = \frac{1}{1 - \frac{N}{N_{cr}}}$$

Здесь N_{cr} - критическая продольная сила, которая вычисляется по формуле:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 D}{l_0^2}$$

где l_0 - расчетная длина сжатого элемента. Жесткость D при нормальной температуре вычисляется согласно [4], Г.2 по формуле:

$$D = \frac{0.15E_{b1}I_b}{\varphi_l(0.3 + \delta_e)} + 0.7(E_s I_s + EI_{st})$$

Здесь $E_{b1} = 0.85E_b$; I_b, I_s, I_{st} - моменты инерции бетонного сечения, сечения арматуры и сечения профиля относительно центральной оси сечения, $\delta_e = e_0 / h$ - относительный эксцентриситет продольной силы, h - высота сечения в плоскости изгиба. Коэффициент φ_l принимается равным 2.

При определении эксцентриситета e_0 учитывается случайный эксцентриситет e_a [4], 7.1.1.5. При расчете элемента статически определимой конструкции, эксцентриситет e_0 принимается равным

$M/N + e_a$, а при расчете элемента статически неопределимой конструкции – равным M/N , если $M/N \geq e_a$, и равным e_a , если $M/N < e_a$.

При расчете по огнестойкости, модули упругости равны:

$$E_{bt} = \beta_b(T)E_b, E_{st} = \beta_s(T)E_s, E_t = \beta_{st}(T)E$$

где $\beta_b(T)$, $\beta_s(T)$, $\beta_{st}(T)$ - коэффициенты редукции модуля упругости бетона, арматуры и конструкционной стали, зависящие от температуры T . При неравномерном нагреве сечения $T = T(y, z)$ и, следовательно, модули упругости зависят от y, z . Выражение для жесткости записывается в виде:

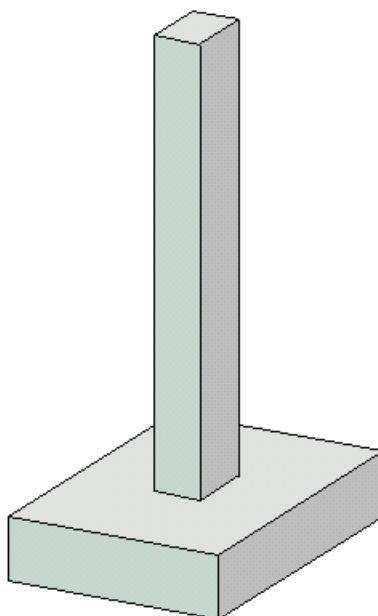
$$D = \frac{0.15}{\varphi_l(0.3 + \delta_e)} 0.85D_b + 0.7(D_s + D_{st})$$

Сечение разбивается на малые элементы, в пределах которых температура принимается постоянной. Тогда величина D_b определяется как $D_b = \sum \beta_{b,i} E_b I_{b,i}$, где $\beta_{b,i} = \beta_b(T_i)$, $I_{b,i}$ - момент инерции площади малого элемента относительно оси изгиба. Величина D_s определяется как $D_s = \sum \beta_{s,i} E_s I_{s,i}$, где $\beta_{s,i} = \beta_s(T_i)$, $I_{s,i}$ - момент инерции площади сечения арматурного стержня относительно оси изгиба. Величина D_{st} определяется как $D_{st} = \beta_{st} EI$, где β_{st} - коэффициент редукции модуля упругости конструкционной стали, определенный для температуры профиля, EI - жесткость сечения профиля при нормальной температуре.

Литература

1. СП 468.1325800.2019 «Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности».
2. СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения».
3. СП 16.13330.2017 «СНиП II-23-81* Стальные конструкции».
4. СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования».
5. ГОСТ 30247.0-94 Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования.
6. EN 1994-1-2: Eurocode 4: Part 1-2: General rules - Structural fire design.
7. DIN EN 1991-1-2 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Brandeinwirkungen auf Tragwerke. September 2003.

452 – Расчёт трубобетонной колонны по огнестойкости



Программа предназначена для расчёта по огнестойкости одноярусной трубобетонной колонны согласно СП 468.1325800.2019 [1], СП 63.13330.2018 [2], СП 16.13330.2017 [3], СП 266.1325800.2016 [4]. Усилия в колонне определяются при помощи нелинейного или линейного расчёта по деформированной или недеформированной схеме. Температурное поле в сечении колонны при огневом воздействии определяется путём решения задачи нестационарной теплопроводности с учётом зависимости теплофизических характеристик бетона от температуры. Проверка прочности при действии продольной силы и изгибающих моментов производится на основе диаграмм деформирования сжатого бетона, арматуры и стали трубы с учётом коэффициентов условий работы, зависящих от температуры.

1. Расчётная схема и сечение

Расчётная схема колонны представляет собой стержневой элемент, имеющий упругие или жёсткие закрепления краёв. Условия закрепления формулируются для горизонтального перемещения и поворота сечения вокруг горизонтальной оси. При расчёте колонны применяется система координат $хуz$, начало которой совпадает с центром тяжести нижнего сечения колонны. Ось $х$ направлена снизу вверх. Предполагается, что вертикальная сила воспринимается в нижней опоре.

Рассматриваются трубобетонные колонны прямоугольного и круглого сечения (рис.1).

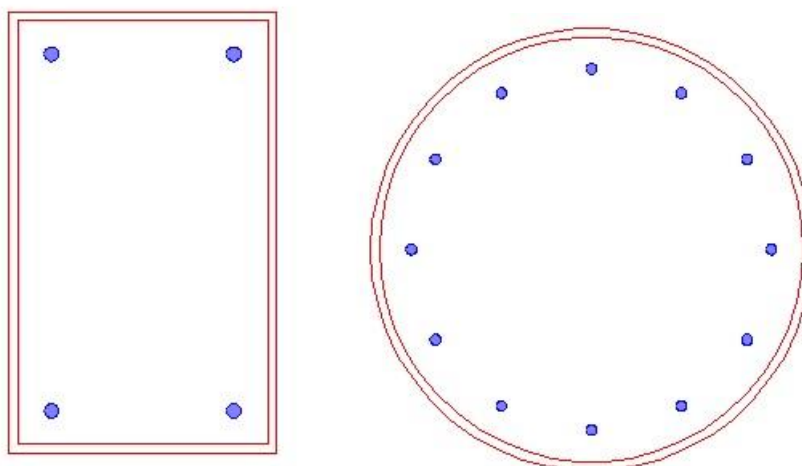


Рис. 1. Сечения

Сечения могут быть как армированными, так и неармированными. Предусмотрены следующие схемы армирования прямоугольного сечения: 1) арматура располагается в углах сечения, 2) арматура располагается вдоль контура сечения. Во втором случае, стержни размещаются в углах и вдоль сторон сечения. При этом задаются числа промежуточных стержней, расположенных вдоль сторон сечения. В случае круглого сечения предполагается, что стержни равномерно распределены вдоль окружности.

2. Нагрузки

Согласно [1], расчет по огнестойкости проводится для наиболее неблагоприятного сочетания нормативных постоянных и длительных нагрузок.

Положительные направления нагрузок показаны на рис.2. Положительные направления моментов совпадают с направлениями моментов от вертикальной силы, смещенной в положительных направлениях осей y и z . Положительные направления смещений жёстких опор

совпадают с направлениями координатных осей. Положительные направления поворотов жёстких опор совпадают с положительными направлениями моментов.

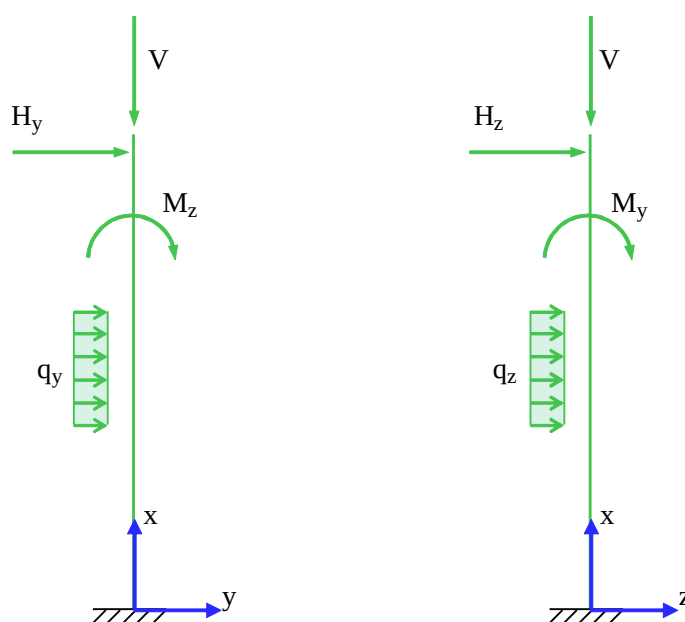


Рис. 2. Положительные направления нагрузок

3. Материалы

Класс бетона и класс арматуры принимаются согласно [2]. Расчёт проводится для бетонов до класса В55 включительно. Диаграммы деформирования бетона и арматуры при нормальной температуре приведены на рис. 3, 4. По горизонтальной оси откладывается значение деформации в промилле ($1\text{‰} = 0.1\% = 0.001$). Отрицательные значения соответствуют деформации сжатия.

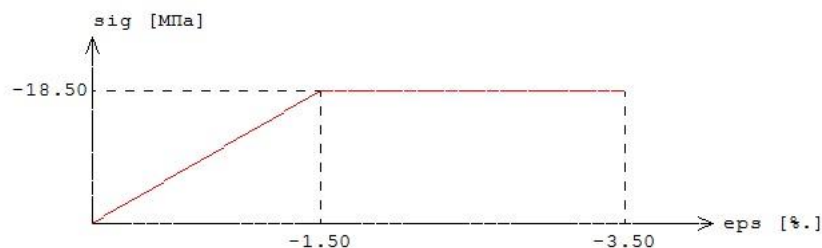


Рис.3. Диаграмма деформирования сжатого бетона В25 при нормальной температуре

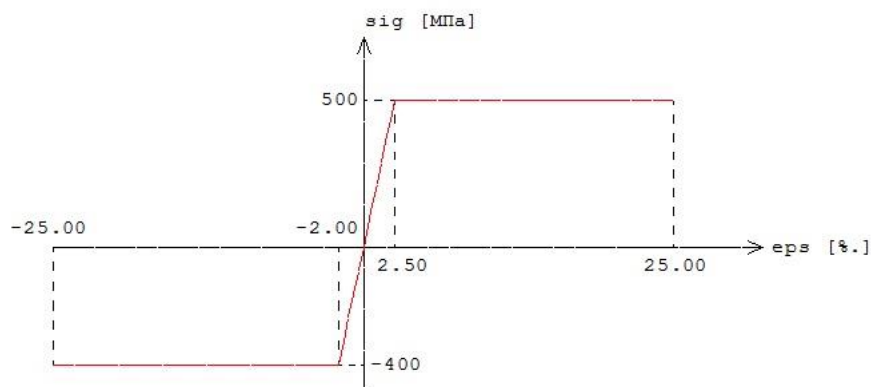


Рис.4. Диаграмма деформирования арматуры А500 при нормальной температуре

Расчётные сопротивления и модули упругости материалов при нагреве определяются по формулам [1]:

$$R_{bnt} = R_{bn} \gamma_{bt}$$

$$E_{bt} = E_b \beta_b$$

$$R_{snt} = R_{sn} \gamma_{st}$$

$$E_{st} = E_s \beta_s$$

Значения коэффициента условий работы бетона γ_{bt} и коэффициента редукции модуля упругости бетона β_b принимаются по таблице 5.1 [1], параметры диаграммы для бетона ε_{b1} , ε_{b2} - по таблице 5.5 [1]. Значения коэффициента условий работы арматуры γ_{st} и коэффициента редукции модуля упругости арматуры β_s принимаются по таблице 5.6 [1]. Предельная деформация арматуры ε_{s2} принимается равной 25‰ при $20^\circ\text{C} \leq T \leq 200^\circ\text{C}$ и равной 50‰ при $T \geq 500^\circ\text{C}$. При $200^\circ\text{C} < T < 500^\circ\text{C}$ предельная деформация ε_{s2} определяется интерполяцией.

Класс стали трубы принимается согласно [3]. Диаграмма деформирования стали при нормальной температуре приведена на рис.5.

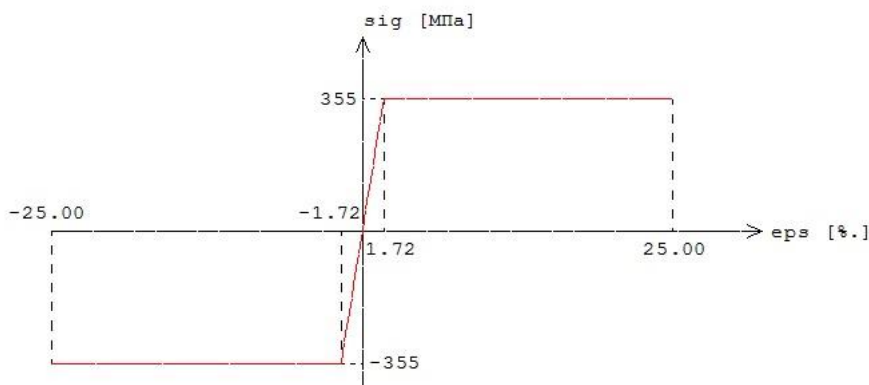


Рис.5. Диаграмма деформирования стали C375 при нормальной температуре

Расчётное сопротивление и модуль упругости стали при нагреве определяются по формулам:

$$R_{ynt} = R_{yn} \gamma_{st}$$

$$E_t = E \beta_{st}$$

где R_{yn} - расчётное сопротивление стали по пределу текучести. Значения коэффициента условий работы стали γ_{st} и коэффициента редукции модуля упругости стали β_{st} принимаются по таблице 3.2 [6] (рис.6).

Коэффициент условий работы стали

№	T [°C]	γ_{st}	№	T [°C]	γ_{st}	№	T [°C]	γ_{st}
1	100	1.00	2	200	1.00	3	300	1.00
4	400	1.00	5	500	0.78	6	600	0.47
7	700	0.23	8	800	0.11	9	900	0.06
10	1000	0.04	11	1100	0.02	12	1200	0.00

Коэффициент редукции модуля упругости стали

№	T [°C]	β_{st}	№	T [°C]	β_{st}	№	T [°C]	β_{st}
1	100	1.00	2	200	0.90	3	300	0.80
4	400	0.70	5	500	0.60	6	600	0.31
7	700	0.13	8	800	0.09	9	900	0.07
10	1000	0.04	11	1100	0.02	12	1200	0.00

Рис.6. Значения γ_{st} , β_{st}

В программе возможен табличный вывод коэффициентов для заданного вида заполнителя бетона и класса арматуры.

4. Расчёт по огнестойкости

Огнестойкость элемента характеризуется периодом времени (в минутах) от начала пожара до момента возникновения предельного состояния элемента. Для несущих элементов, предельным состоянием по огнестойкости является состояние, при котором происходит потеря несущей способности. Предельное состояние наступает тогда, когда предельные усилия становятся равными расчётным усилиям. В программе строится зависимость коэффициента запаса прочности γ_u от времени. Предел огнестойкости определяется по моменту времени, при котором $\gamma_u = 1$.

Экспериментально установлено, что разрушение железобетонного элемента при огневом воздействии происходит аналогично разрушению при нормальной температуре. Предельные усилия при огневом воздействии определяются на основе диаграмм деформирования сжатого бетона, арматуры и стали трубы при тех же предположениях, что и при нормальной температуре. Основными предположениями являются следующие: деформации распределяются по линейному закону, напряжения в растянутом бетоне пренебрежимо малы. При определении предельных усилий при огневом воздействии учитывается зависимость прочностных и деформационных характеристик материалов от температуры.

4.1 Определение температурного поля

Для определения предела огнестойкости, необходимо рассчитать температурное поле в сечении элемента от огневого воздействия. Температурное поле $T(y,z,t)$ определяется на основе уравнения нестационарной теплопроводности:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = c \rho \frac{\partial T}{\partial t}$$

Здесь λ - коэффициент теплопроводности, c - удельная теплоёмкость, ρ - плотность материала. При расчёте температуры в сечении элемента не учитывается наличие арматуры и трубы.

Коэффициент теплопроводности бетона в [Вт/(м⁰С)] определяется по следующим формулам (см.[1], 6.3):

- для бетона на силикатном заполнителе $\lambda = 1.2 - 0.00035T$
- для бетона на карбонатном заполнителе $\lambda = 1.14 - 0.00055T$

Удельная теплоёмкость бетона в $[\text{Дж}/(\text{кг}^\circ\text{C})]$ на силикатном или карбонатном заполнителе равна $c = 710 + 0.83T$. В программе предусмотрен учёт влажности бетона согласно [7], при котором зависимость удельной теплоёмкости от температуры характеризуется пиковым значением при 115°C , равным 1470 и 2020 при влажности 1.5% и 3% соответственно.

Огневое воздействие характеризуется зависимостью температуры среды от времени, отсчитываемого от начала пожара. Согласно [5], при стандартном пожаре, принимается следующая зависимость температуры среды от времени:

$$T_0 = 20 + 345 \lg(8t + 1)$$

где t - время в мин. График зависимости $T_0(t)$ представлен на рис.7.

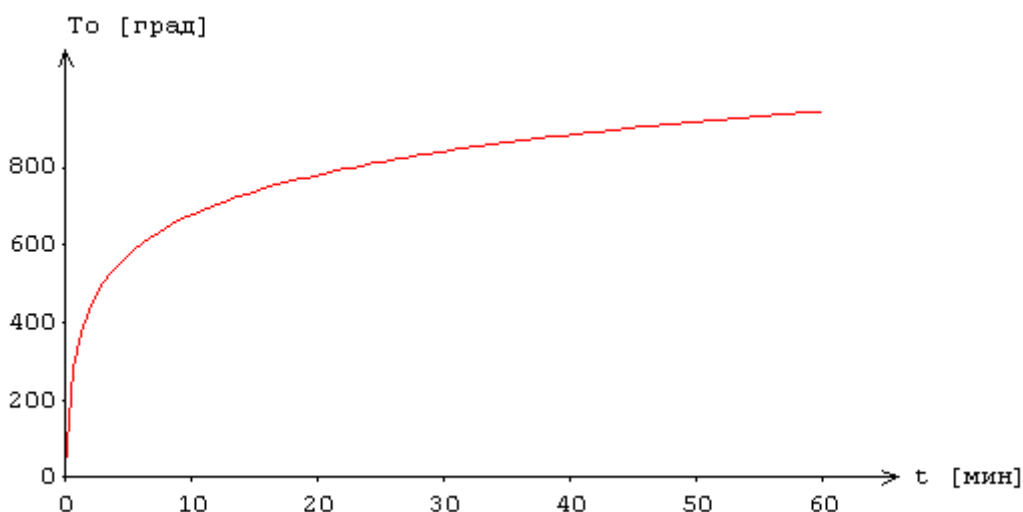


Рис.7. Зависимость температуры среды от времени

Расчёт колонны по огнестойкости проводится для случая всестороннего нагрева. На сторонах сечения ставится условие равенства теплового потока от границы в глубь сечения и теплового потока к границе от среды.

Температурная задача решается конечноразностным методом. Производная $\frac{\partial T}{\partial t}$ заменяется разностным отношением:

$$\frac{T(y, z, t + \Delta t) - T(y, z, t)}{\Delta t}$$

где Δt - шаг по времени. Расчёт температурного поля в сечении производится для дискретных моментов времени. Шаг по времени может приниматься равным 3мин, 6мин, 12мин или задаваться другим значением в пределах от 1мин до 30мин. В общем случае, при увеличении шага, уменьшается объём вычислений, однако может снижаться точность результата.

Производные по координатам также заменяются разностными отношениями. После определения температуры на конечноразностной сетке температура в произвольной точке сечения определяется интерполяцией. В качестве примера на рис.8 приведены изотермы, полученные при нагреве прямоугольного сечения.

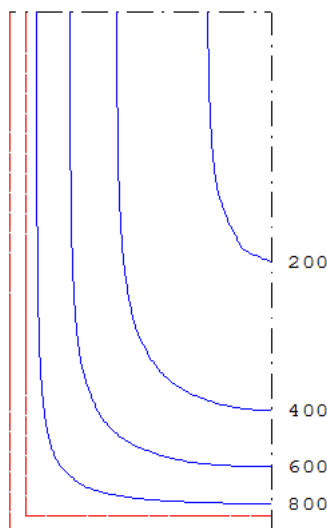


Рис.8. Изотермы

При вводе исходных данных программы могут быть заданы управляющие параметры расчёта температурного поля: номинальный шаг сетки s и максимальное число точек сетки в одном направлении $N_{\max}$. Если значение s не задано, то принимается $s = 10$ мм. Если значение $N_{\max}$ не задано, то принимается $N_{\max} = 60$. Аналогичные параметры могут быть заданы для управления разбиением сжатой зоны бетона на малые элементы при определении предельных усилий.

В программе предусмотрен вывод температуры в заданных точках. В случае прямоугольного сечения, точки задаются в системе координат (Y, Z) с началом в левой точке нижней стороны сечения. При этом ось Y направляется вправо по нижней стороне сечения, а ось Z - вверх по левой стороне сечения. В случае круглого сечения, точки задаются на оси y .

4.2 Расчёт усилий

Усилия в колонне могут определяться на основе нелинейного или линейного расчёта по деформированной или недеформированной схеме. При расчёте возможен отказ от учёта прогиба в одной или двух плоскостях. Если прогиб колонны в плоскости Y или Z стеснён или невозможен, то для соответствующей плоскости расчёт проводится без учёта влияния прогиба. При расчёте по деформированной схеме предусмотрен учёт несовершенства колонны путём учёта начального прогиба по форме потери устойчивости центральносжатой колонны.

В линейном расчёте, усилия в колонне определяются при жёсткостных характеристиках D_y, D_z приведённого сечения, вычисленных в предположении упругого деформирования бетона, арматуры и стали.

В нелинейном расчёте, кривизны κ_y, κ_z определяются на основе диаграмм деформирования сжатого бетона, арматуры и стали при огневом воздействии. Из-за нелинейного характера зависимости кривизны от изгибающего момента, система уравнений продольно-поперечного изгиба является нелинейной. Колонна разбивается на участки, в пределах которых производится линеаризация уравнений. Предусмотрен ввод номинального шага дискретизации колонны. Нелинейный расчёт проводится при помощи метода итераций. Итерационный процесс оканчивается тогда, когда относительные приращения моментов M_y, M_z и прогибов w_y, w_z становятся малыми. Для контроля точности результатов нелинейного расчёта выводится итерационная погрешность ε [%].

Возможен выбор режима расчёта. При выборе первого режима, нелинейный расчёт усилий проводится при достижении предела огнестойкости. При выборе второго режима, нелинейный расчёт усилий проводится с шагом, кратным шагу для расчёта температурного поля. Усилия, полученные по нелинейному расчёту в текущий момент времени, используются для проверки прочности вплоть до следующего момента проведения нелинейного расчёта. Время вычислений при втором режиме расчёта может быть значительно больше, чем при первом режиме.

По результатам расчёта усилий производится выбор сочетаний усилий, для которых проводится проверка прочности. Выбираются такие сочетания усилий, для которых изгибающие моменты M_y , M_z принимают наибольшие абсолютные значения.

4.3 Определение предельных усилий

Предельные усилия принимаются пропорциональными расчётным усилиям: $N_u = \gamma_u N$, $M_{yu} = \gamma_u M_y$, $M_{zu} = \gamma_u M_z$. Прочность сечения обеспечена, если коэффициент γ_u не меньше единицы. Предполагается, что деформации в сечении распределяются по линейному закону $\varepsilon(y, z) = \varepsilon_0 + \kappa_y y + \kappa_z z$, где κ_y, κ_z - кривизны. Предельные усилия определяются на основе следующих уравнений:

$$\begin{aligned} \int_{A_b} \sigma_b dA + \int_{A_s} \sigma_s dA + \int_{A_p} \sigma_p dA &= \gamma_u N \\ \int_{A_b} \sigma_b z dA + \int_{A_s} \sigma_s z dA + \int_{A_p} \sigma_p z dA &= \gamma_u M_y \\ \int_{A_b} \sigma_b y dA + \int_{A_s} \sigma_s y dA + \int_{A_p} \sigma_p y dA &= -\gamma_u M_z \end{aligned}$$

Здесь $\sigma_b = f_b(\varepsilon, T)$ - напряжение в сжатом бетоне, $\sigma_s = f_s(\varepsilon, T)$ - напряжение в арматуре, $\sigma_p = f_p(\varepsilon, T)$ - напряжение в трубе, $T = T(y, z, t)$ - температура, A_b - сжатая зона бетонного сечения, A_s - сечение арматуры, A_p - сечение трубы.

Для вычисления интегралов по A_b производится разбиение сжатой зоны сечения на малые элементы, в пределах которых напряжение принимается постоянным. Определение интегралов сводится к вычислению конечных сумм. При вычислении интегралов по A_s принимается, что площадь сечения арматурного стержня сосредоточена в его центре. Температура арматурного стержня принимается равной температуре в точке, совпадающей с центром сечения стержня. Вычисление интегралов по A_p производится как для полигонального контура. Температура трубы принимается равной наибольшей температуре в средних точках сторон бетонного сечения. Распределение деформации в предельном состоянии $\varepsilon_u(y, z)$ отыскивается из ограничения деформации сжатого бетона значением ε_{b2} , из ограничения деформации растянутой арматуры значением ε_{s2} , из ограничения деформации стали значением 2.5‰=25промилле. Для каждого положения нейтральной линии однозначно определяется деформация в предельном состоянии. В результате решения системы трёх нелинейных уравнений определяется положение нейтральной линии и коэффициент запаса прочности γ_u . На рис.9 приведен пример зависимости коэффициента γ_u от времени при стандартном пожаре.

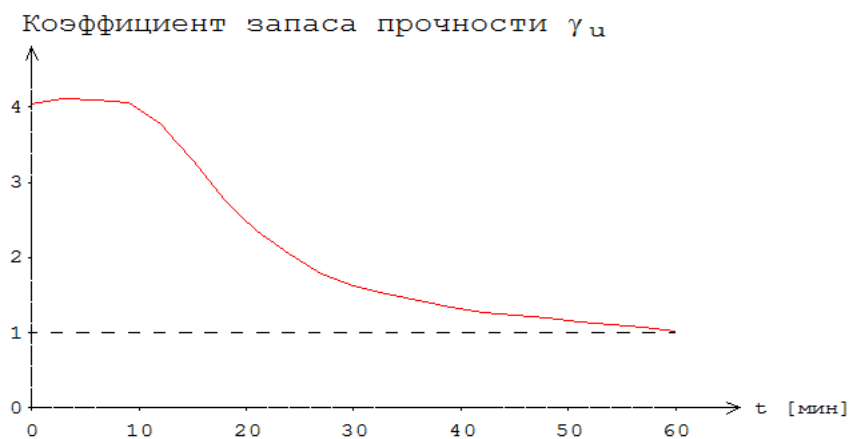


Рис.9. Пример зависимости коэффициента γ_u от времени

В программе предусмотрен вывод результатов расчёта предельных усилий для предела огнестойкости. Помимо предельных усилий, выводятся кривизны, максимальные и минимальные (в алгебраическом смысле) деформации бетона, арматуры и стали. Если предельная деформация бетона достигается в точке, лежащей внутри сжатой зоны, то выводятся координаты этой точки, температура T и предельное значение деформации $\varepsilon_{b2}(T)$. В случае, когда нейтральная линия пересекает сечение элемента, выводится изображение сжатой зоны сечения (рис.10).

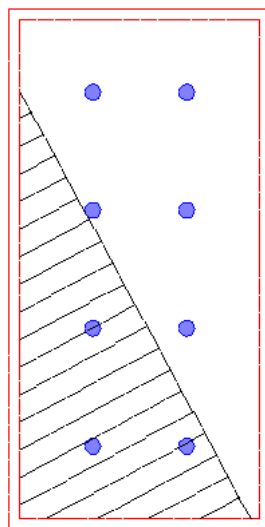


Рис.10. Пример изображения сжатой зоны сечения

4.4 Учёт влияния прогиба при расчёте по недеформированной схеме

При расчёте усилий в колонне по недеформированной схеме, величина расчётного момента определяется путем умножения изгибающего момента M на повышающий коэффициент:

$$\eta = \frac{1}{1 - \frac{N}{N_{cr}}}$$

Здесь N_{cr} - критическая продольная сила, которая вычисляется по формуле:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 D}{l_0^2}$$

где l_0 - расчётная длина сжатого элемента. Жёсткость D при нормальной температуре вычисляется согласно [4], Г.2 по формуле:

$$D = \frac{0.15 E_{b1} I_b}{\varphi_l (0.3 + \delta_e)} + 0.7 (E_s I_s + E I_{st})$$

Здесь $E_{b1} = 0.85 E_b$; I_b, I_s, I_{st} - моменты инерции бетонного сечения, сечения арматуры и сечения трубы относительно центральной оси сечения, $\delta_e = e_0 / h$ - относительный эксцентриситет продольной силы, h - высота сечения в плоскости изгиба. Коэффициент φ_l принимается равным 2.

При определении эксцентриситета e_0 , учитывается случайный эксцентриситет e_a [4], 7.1.1.5. При расчёте элемента статически определимой конструкции, эксцентриситет e_0 принимается равным $M / N + e_a$, а при расчёте элемента статически неопределимой конструкции – равным M / N , если $M / N \geq e_a$, и равным e_a , если $M / N < e_a$.

При расчёте по огнестойкости модули упругости равны:

$$E_{bt} = \beta_b(T) E_b, E_{st} = \beta_s(T) E_s, E_t = \beta_{st}(T) E$$

где $\beta_b(T)$, $\beta_s(T)$, $\beta_{st}(T)$ - коэффициенты редукции модуля упругости бетона, арматуры и стали трубы, зависящие от температуры T . При нагреве сечения $T = T(y, z)$ и, следовательно, модули упругости зависят от y, z . Выражение для жёсткости записывается в виде:

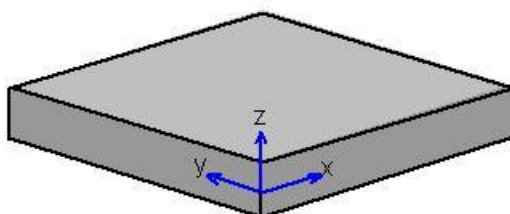
$$D = \frac{0.15}{\varphi_l (0.3 + \delta_e)} 0.85 D_b + 0.7 (D_s + D_{st})$$

Сечение разбивается на малые элементы, в пределах которых температура принимается постоянной. Тогда величина D_b определяется как $D_b = \sum \beta_{b,i} E_b I_{b,i}$, где $\beta_{b,i} = \beta_b(T_i)$, $I_{b,i}$ - момент инерции площади малого элемента относительно оси изгиба. Величина D_s определяется как $D_s = \sum \beta_{s,i} E_s I_{s,i}$, где $\beta_{s,i} = \beta_s(T_i)$, $I_{s,i}$ - момент инерции площади сечения арматурного стержня относительно оси изгиба. Величина D_{st} определяется как $D_{st} = \beta_{st} E I$, где β_{st} - коэффициент редукции модуля упругости стали, определённый для температуры трубы, $E I$ - жёсткость сечения трубы при нормальной температуре.

Литература

1. СП 468.1325800.2019 «Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности».
2. СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения».
3. СП 16.13330.2017 «СНиП II-23-81* Стальные конструкции».
4. СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования».
5. ГОСТ 30247.0-94 Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования.
6. EN 1994-1-2: Eurocode 4: Part 1-2: General rules - Structural fire design.
7. DIN EN 1991-1-2 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Brandeinwirkungen auf Tragwerke. September 2003.

453 – Расчет по огнестойкости плит и стен



Программа предназначена для расчёта по огнестойкости железобетонных плит и стен согласно СП 468.1325800.2019 [1] и СП 63.13330.2018 [2]. Температурное поле в сечении элемента при огневом воздействии определяется путем решения задачи нестационарной теплопроводности с учетом зависимости теплофизических характеристик бетона от температуры. Предельные усилия вычисляются на основе диаграмм деформирования сжатого бетона и арматуры.

1. Расчетная схема

Рассматривается плоский элемент единичных размеров в плане и толщиной h . Применяется система координат (x, y, z) , оси x и y которой лежат в срединной плоскости элемента. Продольная арматура размещается у верхней и нижней сторон сечения вдоль осей x и y (рис.1). При определении предельных усилий, арматура в каждом направлении представляется в виде арматурного слоя с погонной площадью $A_s = \frac{\pi d_s^2}{4s}$, где d_s - диаметр стержней, s - шаг стержней.

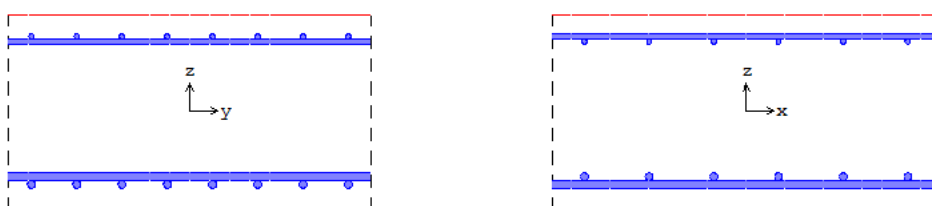


Рис.1. Сечения, нормальные к осям x и y

2. Усилия

В общем случае, в поперечных сечениях элемента, нормальных к оси x , действуют изгибающий момент M_x , крутящий момент M_{xy} , нормальная сила N_x и сдвигающая сила N_{xy} . В поперечных сечениях элемента, нормальных к оси y , действуют изгибающий момент M_y , крутящий момент M_{xy} , нормальная сила N_y и сдвигающая сила N_{xy} . Усилия имеют размерности погонных единиц.

Изгибающий момент является положительным, если при его действии сжатая зона возникает в верхней части сечения (см. рис.1). Знак крутящего момента не имеет значения. Нормальная сила является положительной при сжатии. Знак сдвигающей силы не имеет значения. На рис.2 показаны элементы плиты и стены. В случае стены, ось y направляется вдоль вертикали. В программе, при расчете плиты, не учитывается сдвигающая сила N_{xy} , а при расчете стены - крутящий момент M_{xy} .

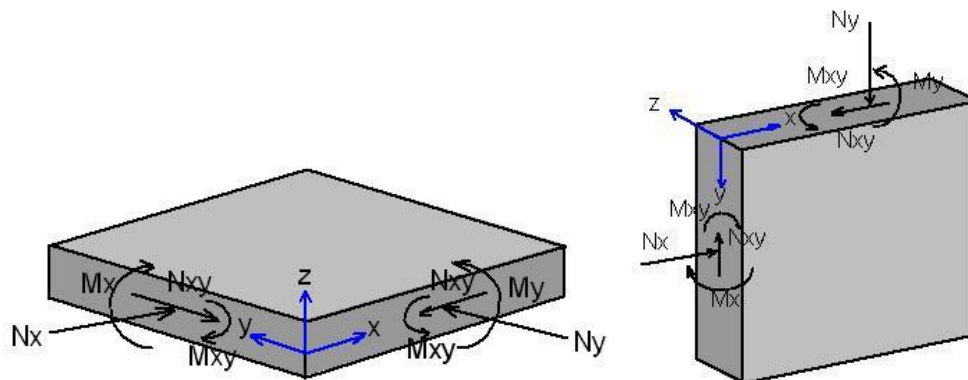


Рис. 2. Усилия в плите и стене

3. Материалы

Класс бетона и класс арматуры принимаются согласно [2]. Расчет проводится для бетонов до класса В55 включительно. Диаграммы деформирования бетона и арматуры при нормальной температуре приведены на рис. 3, 4. По горизонтальной оси откладывается значение деформации в промилле ($1\text{‰}=0.1\%=0.001$). Отрицательные значения соответствуют деформации сжатия.

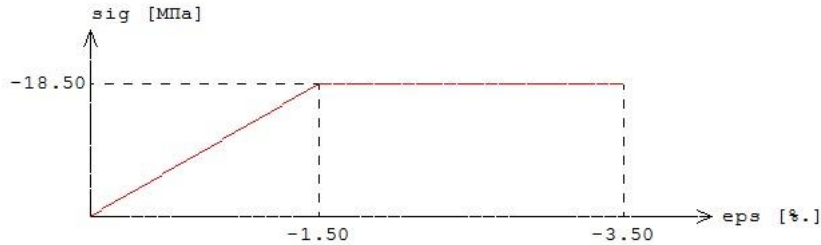


Рис.3. Диаграмма деформирования сжатого бетона В25 при нормальной температуре

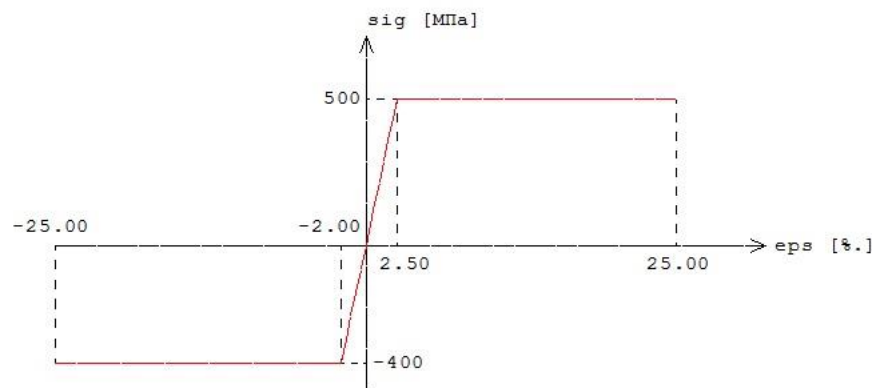


Рис.4. Диаграмма деформирования арматуры А500 при нормальной температуре

Расчетные сопротивления и модули упругости материалов при нагреве определяются по формулам [1]:

$$R_{bnt} = R_{bn} \gamma_{bt}$$

$$E_{bt} = E_b \beta_b$$

$$R_{stt} = R_{sn} \gamma_{st}$$

$$E_{st} = E_s \beta_s$$

Значения коэффициента условий работы бетона γ_{bt} и коэффициента редукции модуля упругости бетона β_b принимаются по таблице 5.1 [1], параметры диаграммы для бетона ε_{bt1} , ε_{bt2} - по таблице 5.5 [1]. Значения коэффициента условий работы арматуры γ_{st} и коэффициента редукции модуля упругости арматуры β_s принимаются по таблице 5.6 [1]. Предельная деформация арматуры ε_{s2} принимается равной 25‰ при $20^\circ\text{C} \leq T \leq 200^\circ\text{C}$ и равной 50‰ при $T \geq 500^\circ\text{C}$. При $200^\circ\text{C} < T < 500^\circ\text{C}$ предельная деформация ε_{s2} определяется интерполяцией.

В программе возможен табличный вывод коэффициентов для заданного вида заполнителя в бетоне и класса арматуры.

4. Расчет по огнестойкости

Огнестойкость элемента характеризуется периодом времени (в минутах) от начала пожара до момента возникновения предельного состояния элемента. Для несущих элементов предельным состоянием по огнестойкости является состояние, при котором происходит потеря несущей способности. Предельное состояние наступает тогда, когда предельные усилия становятся равными расчетным усилиям. В программе строится зависимость коэффициента запаса прочности γ_u от времени. Предел огнестойкости определяется по моменту времени, при котором $\gamma_u = 1$ (рис.5).

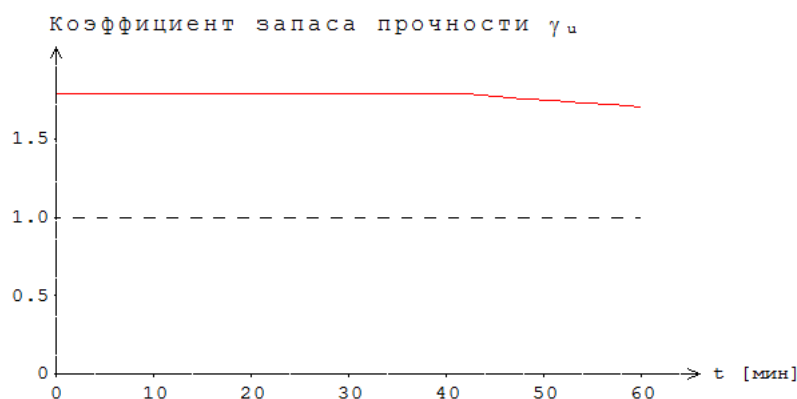


Рис.5. Пример зависимости коэффициента γ_u от времени

4.1 Определение температурного поля

При расчете по огнестойкости рассматривается нагрев одной стороны элемента. Для определения предела огнестойкости, необходимо рассчитать температурное поле в сечении элемента от огневого воздействия. Изменение температуры по толщине элемента определяется на основе уравнения нестационарной теплопроводности.

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = c \rho \frac{\partial T}{\partial t}$$

Здесь λ - коэффициент теплопроводности, c - удельная теплоемкость, ρ - плотность материала. При расчете температуры не учитывается наличие арматуры.

Коэффициент теплопроводности бетона в [Вт/(м⁰С)] определяется по следующим формулам (см.[1], 6.3):

- для бетона на силикатном заполнителе $\lambda = 1.2 - 0.00035T$;
- для бетона на карбонатном заполнителе $\lambda = 1.14 - 0.00055T$.

Удельная теплоемкость бетона в [Дж/(кг⁰С)] на силикатном или карбонатном заполнителе равна $c = 710 + 0.83T$. В программе предусмотрен учет влажности бетона согласно [4], при котором зависимость удельной теплоемкости от температуры характеризуется пиковым значением при 115⁰С, равным 1470 и 2020 при влажности 1.5% и 3% соответственно.

Огневое воздействие характеризуется зависимостью температуры среды от времени, отсчитываемого от начала пожара. Согласно [3], при стандартном пожаре принимается следующая зависимость температуры среды от времени:

$$T_0 = 20 + 345 \lg(8t + 1), \text{ где } t - \text{ время в мин.}$$

График зависимости $T_0(t)$ представлен на рис.6.

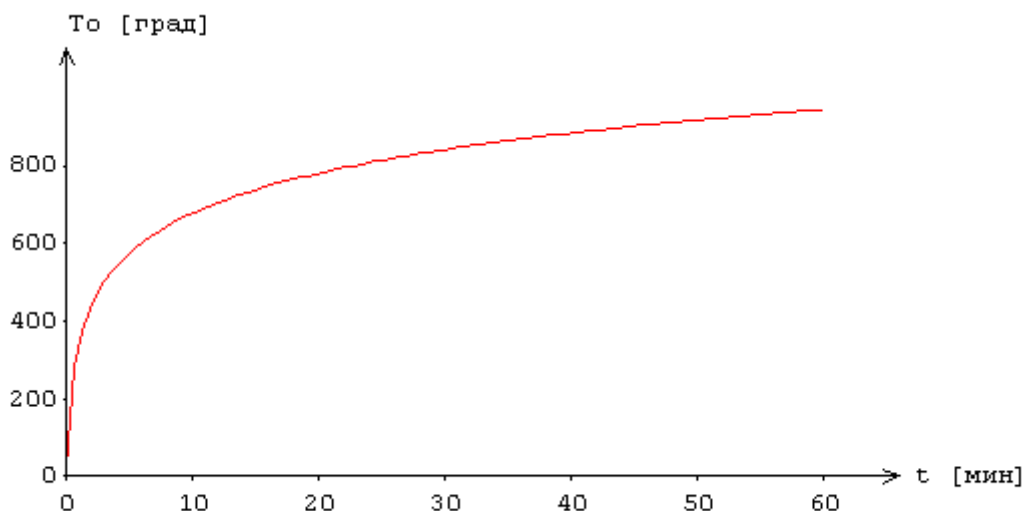


Рис.6. Зависимость температуры среды от времени

На сторонах сечения ставится условие равенства теплового потока от границы вглубь сечения и теплового потока к границе от среды.

Температурная задача решается конечноразностным методом. Производная $\frac{\partial T}{\partial t}$ заменяется разностным отношением

$$\frac{T(y, z, t + \Delta t) - T(y, z, t)}{\Delta t}$$

где Δt - шаг по времени. Расчет температурного поля в сечении производится для дискретных моментов времени. Шаг по времени может приниматься равным 3мин, 6мин, 12мин или задаваться другим значением в пределах от 1мин до 30мин. После определения температуры на конечноразностной сетке температура при произвольном значении z определяется интерполяцией. Пример изменения температуры по толщине элемента приведен на рис.7.

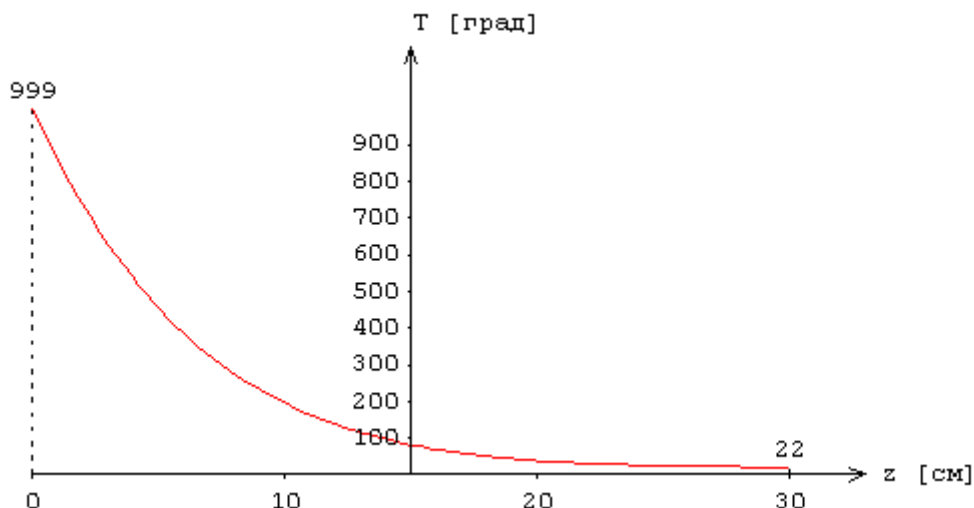


Рис.7. Пример изменения температуры по толщине элемента

При вводе исходных данных программы могут быть заданы управляющие параметры расчета температурного поля: номинальный шаг сетки s и максимальное число точек сетки $N_{\max}$. Если значение s не задано, то принимается $s = 10$ мм. Если значение $N_{\max}$ не задано, то принимается

$N_{\max} = 60$. Аналогичные параметры могут быть заданы для управления разбиением сжатой зоны сечения при определении предельных усилий.

В программе предусмотрен вывод температуры в заданных точках, определяемых координатой Z , которая отсчитывается от нижней стороны сечения.

4.2 Определение предельных усилий

Предельные значения изгибающего момента и нормальной силы определяются на основе диаграмм деформирования сжатого бетона и арматуры с учетом зависимости характеристик материалов от температуры. Нормативные сопротивления сжатого бетона и арматуры при нормальной температуре принимаются согласно [2].

Предельные усилия принимаются пропорциональными расчетным усилиям: $N_u = \gamma_u N$, $M_u = \gamma_u M$. Прочность сечения обеспечена, если коэффициент γ_u не меньше единицы. Предполагается, что деформация в сечении распределяется по линейному закону $\varepsilon(z) = \varepsilon_0 + \kappa z$, где κ - кривизна. Предельные усилия определяются на основе следующих уравнений:

$$\int_{h_b} \sigma_b dz + \sum_i \sigma_{s,i} A_{s,i} = \gamma_u N$$

$$\int_{h_b} \sigma_b z dz + \sum_i \sigma_{s,i} A_{s,i} z_i = \gamma_u M$$

Здесь $\sigma_b = f_b(\varepsilon, T)$ - напряжение в сжатом бетоне, $T = T(z, t)$ - температура, h_b - высота сжатой зоны бетона, $\sigma_{s,i} = f_s(\varepsilon_i, T_i)$ - напряжение в арматуре; ε_i , T_i , $A_{s,i}$, z_i - соответственно деформация, температура, погонная площадь и координата верхней и нижней арматуры ($i = 1, 2$)

Для вычисления интегралов по h_b производится разбиение высоты сжатой зоны сечения на элементы, в пределах которых напряжение принимается постоянным. Определение интегралов сводится к вычислению конечных сумм.

Распределение деформации в предельном состоянии $\varepsilon_u(z)$ отыскивается из ограничения деформации сжатого бетона значением ε_{b2} и из ограничения деформации растянутой арматуры значением ε_{s2} . Для каждого положения нейтральной линии однозначно определяется распределение деформации в предельном состоянии. В результате решения системы двух нелинейных уравнений определяется положение нейтральной линии и коэффициент запаса прочности γ_u .

4.3 Условия прочности плиты

Проверка прочности плиты на действие изгибающих моментов M_x, M_y и крутящего момента M_{xy} проводится согласно [2] по следующим условиям:

$$M_x / M_{xu} \leq 1$$

$$M_y / M_{yu} \leq 1$$

$$(M_{xu} - M_x)(M_{yu} - M_y) - M_{xy}^2 \geq 0$$

$$M_{xy} / M_{bxy,u} \leq 1$$

$$M_{xy} / M_{sxy,u} \leq 1$$

Третье условие преобразуется к виду:

$$\frac{1}{\frac{M_x}{M_{xu}} + \frac{M_y}{M_{yu}} - \frac{M_x M_y}{M_{xu} M_{yu}} + \frac{M_{xy}^2}{M_{xu} M_{yu}}} \leq 1$$

Если действуют нормальные силы N_x, N_y , то предельные изгибающие моменты, входящие в третье условие, определяются при фиксированных значениях нормальных сил.

Предельные значения крутящего момента определяются по формулам:

$$M_{bxy,u} = 0.1 R_{bt,cp} h^2$$

$$M_{sxy,u} = 0.5 [R_{st,\epsilon} (A_{sx} + A_{sy})_{\epsilon} + R_{st,n} (A_{sx} + A_{sy})_n] h_0$$

Здесь $R_{bt,cp}$ - среднее по высоте сечения сопротивление бетона, $R_{st,\epsilon}$, $R_{st,n}$ - сопротивления верхней и нижней арматуры, $h_0 = h - d_{cp}$ - среднее значение рабочей высоты.

Для каждого из пяти условий прочности определяется коэффициент запаса $\gamma_{u,i}$ как величина, обратная к левой части условия, и выбирается $\gamma_u = \min(\gamma_{u,i})$.

4.4 Условия прочности стены

Проверка прочности стены на действие нормальных сил N_x, N_y и сдвигающей силы N_{xy} проводится согласно [2], по следующим условиям:

$$N_x / N_{xu} \leq 1$$

$$N_y / N_{yu} \leq 1$$

$$(N_{xu} - N_x)(N_{yu} - N_y) - N_{xy}^2 \geq 0$$

$$N_{xy} / N_{bxy,u} \leq 1$$

$$N_{xy} / N_{sxy,u} \leq 1$$

Третье условие преобразуется к виду:

$$\frac{1}{\frac{N_x}{N_{xu}} + \frac{N_y}{N_{yu}} - \frac{N_x N_y}{N_{xu} N_{yu}} + \frac{N_{xy}^2}{N_{xu} N_{yu}}} \leq 1$$

Если действуют изгибающие моменты M_x, M_y , то предельные нормальные силы, входящие в третье условие, определяются при фиксированных значениях изгибающих моментов.

Предельные значения сдвигающей силы определяются по формулам:

$$N_{bxy,u} = 0.3 R_{bt,cp} h$$

$$N_{sxy,u} = 0.5 [R_{st,\epsilon} (A_{sx} + A_{sy})_{\epsilon} + R_{st,n} (A_{sx} + A_{sy})_n]$$

Здесь $R_{bt,cp}$ - среднее по высоте сечения сопротивление бетона, $R_{st,\epsilon}$, $R_{st,n}$ - сопротивления верхней и нижней арматуры.

Для каждого из пяти условий прочности определяется коэффициент запаса $\gamma_{u,i}$ как величина, обратная к левой части условия, и выбирается $\gamma_u = \min(\gamma_{u,i})$.

4.5 Учет влияния прогиба

При расчете стены, учитывается влияние прогиба в плоскости yz . Расчетный изгибающий момент определяется путем умножения изгибающего момента M_y , найденного на основе недеформированной схемы, на повышающий коэффициент η . Коэффициент η вычисляется по формуле:

$$\eta = \frac{1}{1 - \frac{N_y}{N_{cr}}}$$

где N_{cr} - критическая сила, которая вычисляется по формуле:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 D}{l_0^2}$$

где l_0 - расчетная длина стены в плоскости yz . Жесткость D при нормальной температуре вычисляется, согласно [2], по формуле:

$$D = \frac{0.15 E_b I_b}{\varphi_l (0.3 + \delta_e)} + 0.7 E_s I_s$$

Здесь E_b, E_s - модули упругости бетона и арматуры; I_b, I_s - моменты инерции бетонного сечения и сечения арматуры относительно центральной оси сечения, $\delta_e = e_0 / h$ - относительный эксцентриситет нормальной силы, h - высота сечения в плоскости изгиба. Коэффициент φ_l принимается равным 2.

При определении эксцентриситета e_0 учитывается случайный эксцентриситет e_a [2]. При расчете элемента статически определимой конструкции, эксцентриситет e_0 принимается равным $M_y / N_y + e_a$, а при расчете элемента статически неопределимой конструкции – равным M_y / N_y , если $M_y / N_y \geq e_a$, и равным e_a , если $M_y / N_y < e_a$.

При расчете по огнестойкости, модули упругости равны:

$$E_{bt} = \beta_b(T) E_b, E_{st} = \beta_s(T) E_s$$

где $\beta_b(T), \beta_s(T)$ - коэффициенты редукции модуля упругости бетона и арматуры, зависящие от температуры T . При неравномерном нагреве сечения $T = T(z)$ и, следовательно, модули упругости зависят от z .

Выражение для жесткости представляется в виде:

$$D = \frac{0.15}{\varphi_l (0.3 + \delta_e)} D_b + 0.7 D_s$$

Для вычисления D_b производится разбиение высоты сечения на элементы, в пределах которой напряжение принимается постоянным. Тогда величина D_b определяется как $D_b = \sum \beta_{b,i} E_b I_{b,i}$, где $\beta_{b,i} = \beta_b(T_i)$, $I_{b,i}$ - момент инерции площади малого элемента относительно оси изгиба. Величина D_s определяется как $D_s = \sum \beta_{s,i} E_s I_{s,i}$, где $\beta_{s,i} = \beta_s(T_i)$, $I_{s,i}$ - момент инерции погонной площади сечения арматуры относительно оси изгиба.

При нагреве одной стороны стены, возникают неравномерные температурные деформации, что приводит к прогибу в направлении к нагреваемой стороне. Значение температурного прогиба определяется согласно [1], (8.29) по формуле:

$$e_t = (\alpha_{st} T_s - \alpha_{bt} T_b) \frac{l_0^2}{8h_0}$$

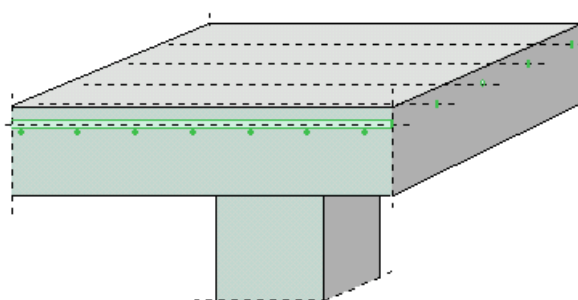
Здесь T_s - температура арматуры у нагреваемой стороны, T_b - температура бетона на ненагреваемой стороне, $\alpha_{st} = \alpha_{st}(T_s)$ - коэффициент линейного расширения арматуры, $\alpha_{bt} = \alpha_{bt}(T_b)$ - коэффициент линейного расширения бетона, h_0 - рабочая высота сечения.

При центральном сжатии стены, знак случайного эксцентриситета e_a выбирается с учетом знака температурного прогиба. При внецентренном сжатии стены, температурный прогиб учитывается в том случае, когда его учет приводит к увеличению расчетного момента.

Литература

1. СП 468.1325800.2019 «Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности».
2. СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения».
3. ГОСТ 30247.0-94 Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования.
4. DIN EN 1991-1-2 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Brandeinwirkungen auf Tragwerke. September 2003.

454 – Расчет на продавливание при огневом воздействии



Программа предназначена для расчёта на продавливание железобетонной плиты при огневом воздействии согласно СП 468.1325800.2019 [1] и СП 63.13330.2018 [2]. Температурное поле в плите определяется путем решения задачи нестационарной теплопроводности с учетом зависимости теплофизических характеристик бетона от температуры. Рассматриваются плиты, опирающиеся на колонны прямоугольного или круглого сечения. В случае колонны прямоугольного сечения рассматриваются два вида расположения поперечной арматуры в зоне продавливания: равномерное и крестообразное. Предусмотрен учет влияния свободных краев плиты.

1. Расчетная схема и нагрузки

Рассматривается железобетонная плита высотой h , опирающаяся на колонну прямоугольного или круглого сечения. В плоскости плиты вводится система координат x, y , начало которой находится в центре сечения колонны. Колонны подразделяются на средние, краевые и угловые. В случае средней колонны, влияние свободных (незакрепленных) краев плиты не учитывается. В случае краевой колонны, учитывается влияние свободного края плиты, параллельного оси x или оси y . В случае угловой колонны, учитывается влияние свободных краев плиты, параллельных осям x и y (рис.1).

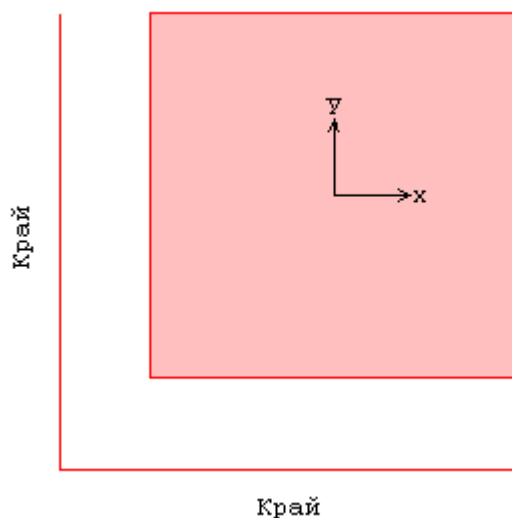


Рис.1. Пример угловой колонны

Рассматриваются плиты как без поперечной арматуры, так и плиты с арматурой, установленной по расчету на продавливание с учетом конструктивных требований.

В случае колонны прямоугольного сечения, рассматривается равномерное (рис.2) или крестообразное расположение арматуры (рис.3). При равномерном расположении арматуры, хомуты размещаются по всей зоне продавливания, а при крестообразном расположении - сосредоточенно у осей сечения колонны.

В случае круглой колонны, хомуты устанавливаются по радиальным направлениям (рис.4).

Расчет на продавливание при огневом воздействии проводится для наиболее неблагоприятных сочетаний нормативных постоянных и длительных нагрузок. Нагрузка на плиту, действующая в пределах сечения колонны, характеризуется продавливающей силой F и моментами M_x, M_y относительно осей x, y . Знаки моментов при расчете не учитываются.

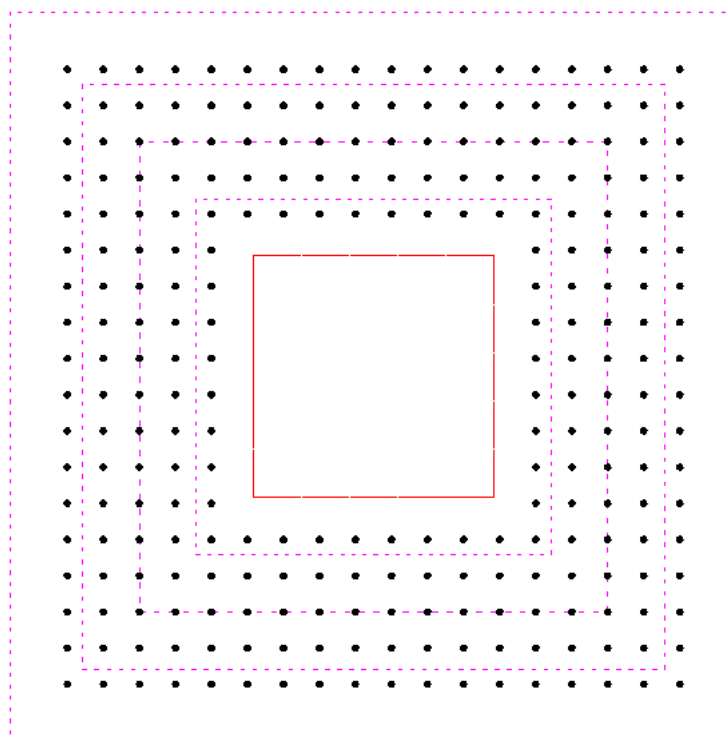


Рис.2. Пример равномерного расположения арматуры

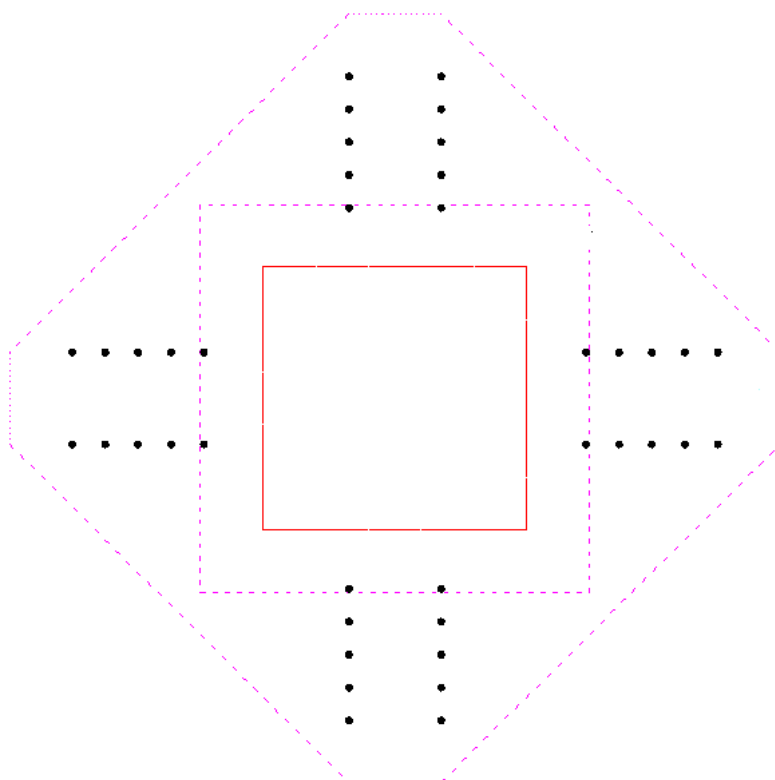


Рис.3. Пример крестообразного расположения арматуры

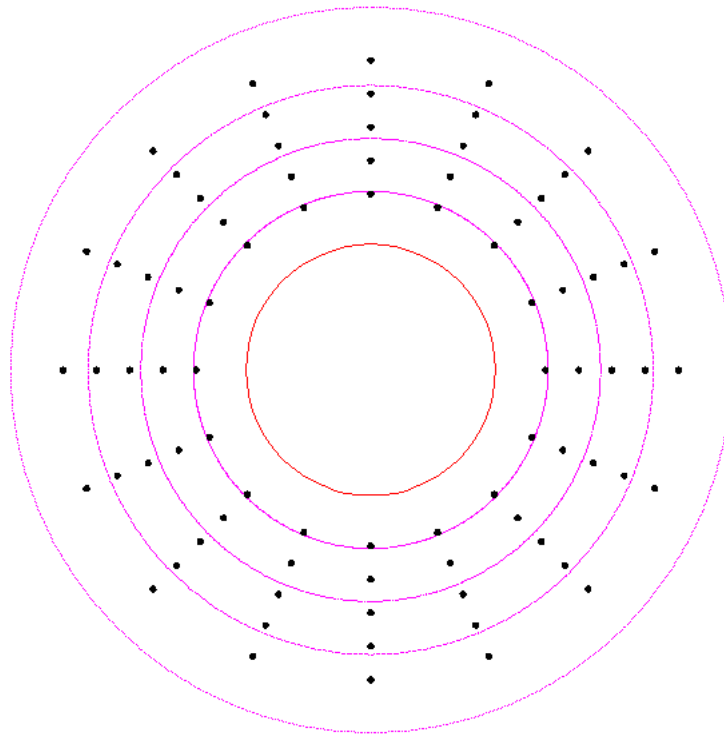


Рис.4. Пример радиального расположения арматуры

2. Расчет на продавливание при нормальной температуре

Расчет на продавливание плиты при нормальной температуре проводится согласно [2], 8.1.46 – 8.1.52. Условие прочности плиты, армированной хомутами в пределах расчетной области, имеет вид:

$$\frac{F}{F_{b,ult} + F_{sw,ult}} + \frac{M_x}{M_{bx,ult} + M_{sw,x,ult}} + \frac{M_y}{M_{by,ult} + M_{sw,y,ult}} \leq 1$$

Здесь $F_{b,ult} = R_{bt} \cdot u \cdot h_0$, $F_{sw,ult} = 0.8 \cdot q_{sw} \cdot u$, $M_{bx,ult} = R_{bt} \cdot W_{bx} \cdot h_0$, $M_{sw,x,ult} = 0.8 \cdot q_{sw} \cdot W_{sw,x}$,

$M_{by,ult} = R_{bt} \cdot W_{by} \cdot h_0$, $M_{sw,y,ult} = 0.8 \cdot q_{sw} \cdot W_{sw,y}$, $q_{sw} = \frac{R_{sw} \cdot A_{sw}}{s_w}$, R_{bt} - расчетное сопротивление

бетона при растяжении, u - периметр расчетного контура, расположенного на расстоянии $h_0/2$ от колонны, R_{sw} - расчетное сопротивление поперечной арматуры, s_w - шаг хомутов вдоль расчетного контура, A_{sw} - суммарная площадь сечений хомутов, расположенных по обе стороны от расчетного контура на расстоянии не более $h_0/2$ в пределах полосы шириной s_w вдоль расчетного контура; W_{bx}, W_{by} - моменты сопротивления расчетного контура, соответствующие изгибающим моментам M_x, M_y . При равномерном расположении поперечной арматуры принимается, что $W_{sw,x} = W_{bx}$ и $W_{sw,y} = W_{by}$. При крестообразном расположении поперечной арматуры периметр и моменты сопротивления арматуры определяются по фактическим длинам $L_{sw,x}$ и $L_{sw,y}$ участков расположения арматуры вдоль расчетного контура.

Прочность плиты без поперечной арматуры проверяется при $F_{sw,ult} = 0$, $M_{sw,x,ult} = 0$, $M_{sw,y,ult} = 0$. Поперечная арматура учитывается при условии $F_{sw,ult} \geq 0.25 \cdot F_{b,ult}$. Знаменатели дробей в условии прочности ограничиваются значениями $2F_{b,ult}$, $2M_{bx,ult}$, $2M_{by,ult}$. Согласно указаниям [2], 8.1.46 учитывается ограничение:

$$\frac{M_x}{M_{bx,ult} + M_{sw,x,ult}} + \frac{M_y}{M_{by,ult} + M_{sw,y,ult}} \leq 0.5 \frac{F}{F_{b,ult} + F_{sw,ult}}$$

В соответствии с [2], производится расчет на продавливание для зоны плиты, находящейся за пределами области армирования.

При крестообразном расположении арматуры, длины $L_{sw,x}$ и $L_{sw,y}$ принимаются равными расстояниям между осями крайних хомутов согласно [2], рис.8.11. Моменты сопротивления арматуры $W_{sw,x}$ и $W_{sw,y}$ определяются относительно центральных осей расчетного контура. При проверке прочности плиты за границей расположения поперечной арматуры расчетный контур принимается согласно [2], рис.8.11.

3. Расчет на продавливание при огневом воздействии

При расчете по огнестойкости рассматривается нагрев нижней стороны плиты. Изменение температуры по высоте плиты определяется на основе уравнения нестационарной теплопроводности:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = c \rho \frac{\partial T}{\partial t}$$

Здесь z - координата, перпендикулярная к плоскости осей x, y ; t - время, λ - коэффициент теплопроводности, c - удельная теплоемкость, ρ - плотность материала. При расчете температуры не учитывается наличие арматуры.

Коэффициент теплопроводности бетона в $[\text{Вт}/(\text{м}^0\text{С})]$ определяется по следующим формулам (см.[1], 6.3):

- для бетона на силикатном заполнителе $\lambda = 1.2 - 0.00035T$;
- для бетона на карбонатном заполнителе $\lambda = 1.14 - 0.00055T$.

Удельная теплоемкость бетона в $[\text{Дж}/(\text{кг}^0\text{С})]$ на силикатном или карбонатном заполнителе равна $c = 710 + 0.83T$. В программе предусмотрен учет влажности бетона согласно [4], при котором зависимость удельной теплоемкости от температуры характеризуется пиковым значением при 115°С , равным 1470 и 2020 при влажности 1.5% и 3% соответственно.

Огневое воздействие характеризуется зависимостью температуры среды от времени, отсчитываемого от начала пожара. Согласно [3], при стандартном пожаре принимается следующая зависимость температуры среды от времени:

$$T_0 = 20 + 345 \lg(8t + 1), \text{ где } t - \text{ время в мин.}$$

График зависимости $T_0(t)$ представлен на рис.5.

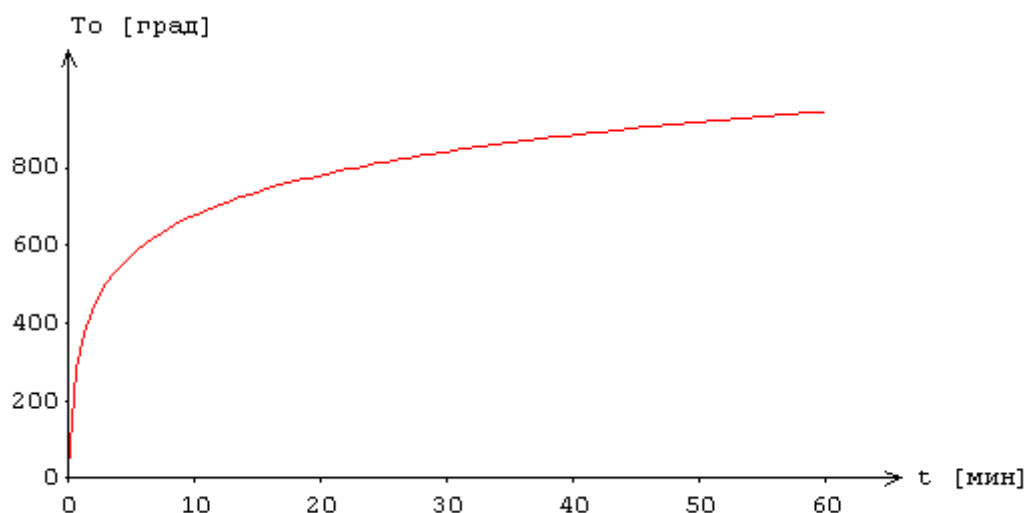


Рис.5. Зависимость температуры среды от времени

Температурная задача решается конечноразностным методом. Производная $\frac{\partial T}{\partial t}$ заменяется разностным отношением:

$$\frac{T(z, t + \Delta t) - T(z, t)}{\Delta t}$$

где Δt - шаг по времени. Расчет температуры производится для дискретных моментов времени. Пример изменения температуры по высоте плиты приведен на рис.6.

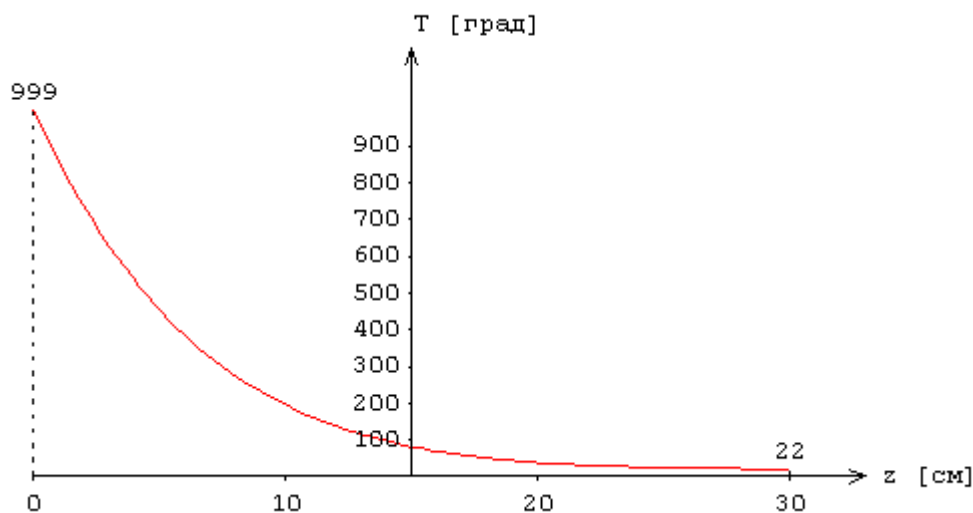


Рис.6. Пример изменения температуры по высоте плиты

Расчет на продавливание при огневом воздействии проводится аналогично расчету плиты при нормальной температуре. При этом расчетное сопротивление бетона при растяжении заменяется на среднее значение сопротивления бетона при повышенной температуре $R_{bnt} = \gamma_{bt} R_{bt}$, которое вычисляется в соответствии с изменением температуры по высоте плиты (рис.7). Расчетное сопротивление поперечной арматуры заменяется на сопротивление арматуры при повышенной

температуре $R_{swt} = \gamma_{st} R_{sw}$, которое определяется по температуре бетона на расстоянии от нагреваемой поверхности, равном толщине защитного слоя бетона.

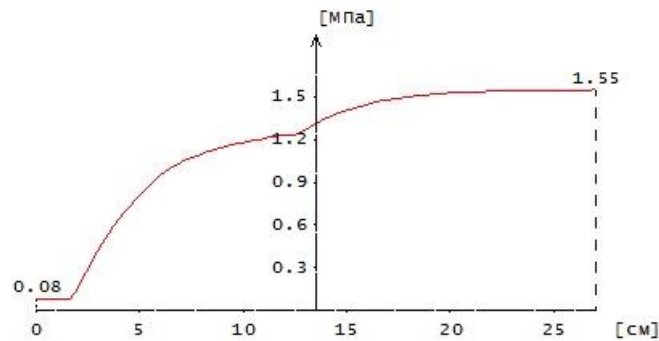


Рис.7. Пример изменения сопротивления бетона R_{bmt} по высоте плиты

Для каждого момента времени определяется коэффициент запаса прочности, который принимается равным обратному значению левой части условия прочности.

$$\gamma_u = 1 / \left(\frac{F}{F_{b,ult} + F_{sw,ult}} + \frac{M_x}{M_{bx,ult} + M_{sw,x,ult}} + \frac{M_y}{M_{by,ult} + M_{sw,y,ult}} \right)$$

Согласно [1], огнестойкость элемента характеризуется периодом времени от начала пожара до момента потери несущей способности. В программе строится зависимость коэффициента запаса прочности γ_u от времени (рис.8). Предел огнестойкости определяется по моменту времени, при котором $\gamma_u = 1$.

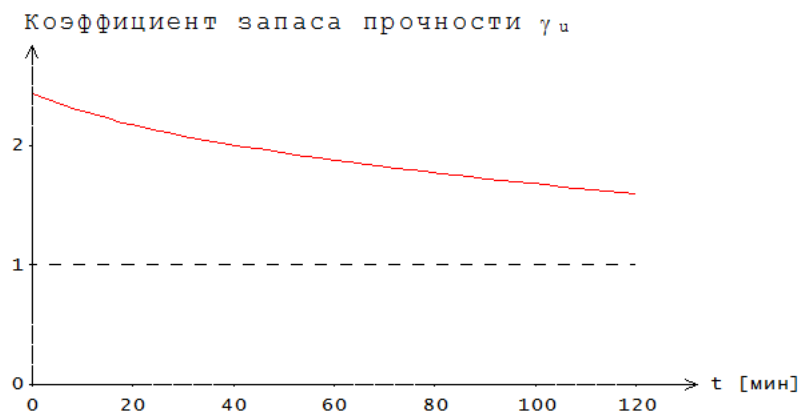


Рис.8. Пример изменения коэффициента γ_u по времени

Литература

1. СП 468.1325800.2019 «Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности».
2. СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения».
3. ГОСТ 30247.0-94 Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования.
4. DIN EN 1991-1-2 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Brandeinwirkungen auf Tragwerke. September 2003.