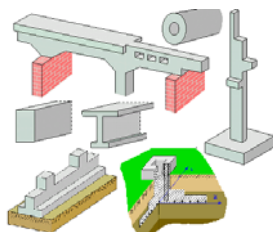




Пакет программ для проектирования и  
расчётов элементов  
строительных конструкций  
**Статика-2011**



*Описание программ*

Copyright© 2011 mb AEC Software GmbH  
Europaallee 14, 67657 Kaiserslautern

ООО ТЕХСОФТ  
117393, Россия, Москва, ул. Архитектора Власова, 49

Тел. (495) 960 22 84

(499) 120 11 33

(499) 128 96 60

Тел./факс: (495) 960 22 83

Internet: [www.tech-soft.ru](http://www.tech-soft.ru)

E-mail: [support@tech-soft.ru](mailto:support@tech-soft.ru)

# Оглавление

<i>Оглавление</i> .....	3
<i>Краткое руководство для пользователя</i> .....	13
1. Назначение .....	13
2. Ввод исходных данных .....	13
3. Расчёт и печать результатов.....	14
4. Создание проектов и управление ими .....	15
<i>200 - Система железобетонных плит</i> .....	17
1. Расчётная схема.....	18
2. Нагружение .....	21
3. Определение внутренних силовых факторов.....	21
4. Расчётные сочетания усилий.....	22
5. Определение требуемой продольной арматуры .....	22
6. Определение требуемой поперечной арматуры.....	23
7. Расчёт на продавливание .....	23
8. Конструирование .....	25
9. Расчёт по трещиностойкости.....	25
10. Расчёт по деформациям .....	25
11. Вывод результатов.....	25
Литература .....	26
<i>270 – Проектирование капителей и банкеток</i> .....	27
1. Расчетная схема и нагрузка .....	28
2. Расчет по СП 52-101-2003 .....	29
3. Расчет по СНиП 2.03.01-84* .....	30
4. Расчет по СНБ 5.03.01-02 .....	31
5. Расчет по ЕС2.....	32
Литература .....	35
<i>300 - Железобетонная балка</i> .....	37
1. Расчётная схема.....	38
2. Нагружение .....	38
3. Определение внутренних силовых факторов.....	39
4. Конструирование продольной арматуры.....	40
5. Конструирование поперечной арматуры.....	40
6. Расчеты по предельным состояниям второй группы.....	40
7. Вывод результатов.....	41

Литература.....	46
<b>301 - Железобетонная балка.....</b>	<b>47</b>
1. Расчётная схема .....	48
2. Нагружение .....	48
3. Определение внутренних силовых факторов .....	50
4. Расчет требуемой арматуры .....	50
5. Конструирование продольной арматуры .....	50
6. Конструирование поперечной арматуры.....	51
7. Расчеты по предельным состояниям второй группы .....	51
8. Вывод результатов .....	51
Литература.....	58
<b>304 - Железобетонная балка (Еврокод 2).....</b>	<b>59</b>
1. Расчётная схема .....	60
2. Нагружение .....	60
3. Определение внутренних силовых факторов .....	61
4. Расчет требуемой арматуры .....	62
5. Конструирование продольной арматуры .....	62
6. Конструирование поперечной арматуры.....	62
7. Расчеты по предельным состояниям по эксплуатационной пригодности.....	63
8. Вывод результатов .....	63
Литература.....	69
<b>313 – Расчет ж/б балки по огнестойкости.....</b>	<b>70</b>
1. Расчетная схема и сечение .....	71
2. Нагрузки.....	71
3. Определение температурного поля.....	72
4. Расчет балки .....	73
4.1 Проверка прочности при действии изгибающего момента.....	74
4.2 Проверка прочности при действии поперечной силы .....	74
5. Нелинейный расчет прогиба .....	75
Литература.....	76
<b>320 – Стальная балка .....</b>	<b>77</b>
1. Расчётная схема .....	78
2. Нагружение .....	78
3. Определение внутренних силовых факторов .....	79
4. Расчет на прочность.....	80
5. Расчет устойчивости плоской формы изгиба балки.....	80
6. Расчет устойчивости стенки балки .....	80

7. Вывод результатов.....	80
Литература .....	86
<b>330 – Несущий элемент из тонкостенных гнутых профилей .....</b>	<b>87</b>
1. Расчетная схема.....	88
2. Нагрузки .....	89
3. Сечение.....	89
4. Расчет .....	90
5. Редуцирование сечения.....	90
Литература .....	93
<b>403 – Подбор поперечной арматуры (Еврокод 2) .....</b>	<b>94</b>
1. Расчетная схема и нагрузки.....	95
2. Расчет .....	95
3. Конструирование .....	97
Литература .....	99
<b>404 – Расчет по трещиностойкости (Еврокод 2) .....</b>	<b>100</b>
1. Сечение.....	101
2. Усилия.....	102
3. Определение минимальной площади арматуры .....	102
4. Расчет ширины раскрытия трещин.....	102
Литература .....	104
<b>406 – Многоярусная колонна общего вида .....</b>	<b>105</b>
1. Расчетная схема.....	106
2. Сечения .....	107
3. Нагрузки .....	109
4. Расчет по недеформированной схеме.....	110
4.1 Расчет согласно СНиП и СНБ.....	110
4.2 Расчет согласно Eurocode 2 .....	113
5. Расчет по деформированной схеме .....	114
6. Конструирование .....	115
7. Учет несовершенств .....	116
8. Учет деформаций ползучести .....	116
9. Учет второстепенных колонн .....	117
10. Расчет прогибов.....	117
Литература .....	119
<b>407 – Расчет ж/б колонны по огнестойкости .....</b>	<b>121</b>
1. Расчетная схема.....	122
2. Сечение.....	122

3. Нагрузки .....	122
4. Расчет .....	123
4.1 Определение температурного поля .....	124
4.2 Определение предельных усилий .....	125
4.3 Нелинейный расчет усилий .....	125
Литература .....	126
<b>410 – Одноярусная колонна общего вида .....</b>	<b>127</b>
1. Расчетная схема .....	128
2. Сечение .....	128
3. Нагрузки .....	130
4. Расчет .....	131
4.1 Расчет согласно СНиП и СНБ .....	132
4.2 Расчет согласно Eurocode 2 .....	134
5. Конструирование .....	135
Литература .....	136
<b>415 – Колонна (сеймика, пульсации ветра) .....</b>	<b>137</b>
1. Расчетная схема .....	138
2. Сечение .....	138
3. Нагрузки .....	140
4. Расчет .....	141
4.1 Расчет согласно СНиП и СНБ .....	142
4.2 Расчет согласно Eurocode 2 .....	144
5. Конструирование .....	145
Литература .....	146
<b>433 – Подбор продольной арматуры (Еврокод 2) .....</b>	<b>147</b>
1. Сечение .....	148
2. Усилия .....	150
3. Расчет .....	151
4. Конструирование .....	152
Литература .....	154
<b>434 – Подбор продольной арматуры .....</b>	<b>155</b>
1. Сечение .....	156
2. Усилия .....	159
3. Расчет .....	159
4. Конструирование .....	161
Литература .....	163
<b>436 – Подбор поперечной арматуры .....</b>	<b>165</b>
1. Расчетная схема и нагрузки .....	166
2. Расчет на изгиб .....	166

3. Расчет на кручение с изгибом.....	168
4. Конструирование .....	170
Литература .....	171
<b>437 – Расчет по трещиностойкости .....</b>	<b>173</b>
1. Сечение.....	174
2. Усилия.....	175
3. Расчет .....	176
4. Конструирование .....	177
Литература .....	179
<b>440 – Расчет на продавливание.....</b>	<b>181</b>
1. Расчетная схема и нагрузка .....	182
2. Расчет по СНиП 2.03.01-84* .....	182
3. Расчет по СП 52-101-2003 .....	183
4. Расчет по СНБ 5.03.01-02 .....	185
5. Расчет по ЕС2.....	186
6. Конструирование арматуры .....	189
Литература .....	191
<b>445 – Расчет на местное сжатие.....</b>	<b>193</b>
1. Расчет по СНиП 2.03.01-84* .....	194
2. Расчет по СП 52-101-2003 .....	196
3. Расчет по СНБ 5.03.01-02 .....	197
4. Конструирование арматуры .....	198
Литература .....	199
<b>450 – Расчет по огнестойкости .....</b>	<b>200</b>
1. Сечения .....	201
2. Усилия.....	202
3. Расчет по огнестойкости.....	202
3.1 Определение температурного поля.....	203
3.2 Определение предельных усилий.....	205
Литература .....	213
<b>454 – Расчет на продавливание при огневом воздействии.....</b>	<b>214</b>
1. Расчетная схема и нагрузка .....	215
2. Расчет на продавливание .....	217
3. Расчет на продавливание при огневом воздействии .....	219
Литература .....	221
<b>462 – База колонны .....</b>	<b>222</b>
1. Конструкция .....	223

2. Нагрузки.....	223
3. Расчет базы .....	223
4. Подбор размеров базы.....	226
Литература.....	227
<b>465 – Подбор сечения стального элемента .....</b>	<b>229</b>
1. Виды сечений.....	230
2. Подбор сечения.....	230
3. Расчет балки .....	231
4. Расчет колонны.....	233
Литература.....	236
<b>467 - Расчетные длины колонн .....</b>	<b>237</b>
1. Расчетная схема .....	238
2. Нагрузки.....	238
3. Расчет .....	239
Литература.....	241
<b>468 - Стальная колонна.....</b>	<b>243</b>
1. Расчетная схема .....	244
2. Нагрузки.....	244
3. Сечение .....	246
4. Расчет на прочность и устойчивость .....	247
5. Расчет прогибов .....	249
Литература.....	251
<b>470 - Сквозная колонна .....</b>	<b>253</b>
1. Расчетная схема .....	254
2. Нагрузки.....	255
3. Сечение колонны.....	256
4. Соединительные элементы.....	258
5. Расчет колонны.....	259
5.1 Определение усилий.....	259
5.2 Определение расчетных длин.....	260
5.3 Проверка прочности и устойчивости колонны.....	260
5.4 Проверка устойчивости ветвей .....	261
5.5 Проверка устойчивости стенок и полок ветвей.....	262
5.6 Расчет планок.....	263
5.7 Расчет раскосов.....	264
Литература.....	266
<b>500 – Плитный фундамент.....</b>	<b>267</b>
1. Расчётная схема .....	268
2. Нагрузки.....	268



3. Расчет усилий, осадки и давления.....	269
4. Расчет продольной арматуры.....	269
5. Расчет поперечной арматуры.....	270
6. Расчёт на продавливание .....	270
7. Конструирование продольной арматуры.....	271
8. Расчёт по трещиностойкости.....	271
Литература .....	272
<b>510 - Железобетонная свая .....</b>	<b>273</b>
1. Грунтовые условия.....	274
2. Свая .....	274
3. Нагружение .....	274
4. Расчёт по несущей способности грунта основания сваи на вертикальную силу .....	275
5. Расчёт на совместное действие вертикальной и горизонтальной сил и момента ...	275
6. Вывод результатов.....	276
Литература .....	277
<b>515 - Свайный фундамент с плитным ростверком .....</b>	<b>279</b>
1. Фундамент .....	280
2. Грунт.....	282
3. Нагрузки .....	285
4. Расчет свай и их оснований .....	286
5. Расчет ростверка .....	288
6. Расчет осадки и крена фундамента .....	289
Литература .....	290
<b>516 - Свайный фундамент с ленточным ростверком.....</b>	<b>291</b>
1. Фундамент .....	292
2. Грунт.....	293
3. Нагрузки .....	296
4. Расчет свай и их оснований .....	297
5. Расчет ростверка .....	299
6. Расчет осадки и крена фундамента .....	299
Литература .....	300
<b>520 - Ленточный фундамент .....</b>	<b>301</b>
1. Расчетная схема.....	302
2. Нагрузки .....	303
3. Расчет усилий, осадки и давления.....	304
4. Расчет и конструирование продольной арматуры.....	304

5. Расчет и конструирование арматуры в свесах полки .....	305
6. Расчет и конструирование поперечной арматуры.....	306
7. Расчет по трещиностойкости .....	306
8. Нелинейный расчет осадки .....	307
Литература.....	308
<b>521 - Ленточный фундамент под стену.....</b>	<b>309</b>
1. Фундамент.....	310
2. Грунт .....	310
3. Нагрузки.....	310
4. Расчет по прочности.....	311
5. Расчет по трещиностойкости .....	311
6. Расчет осадки и крена.....	312
Литература.....	313
<b>535 - Отдельный фундамент под железобетонную колонну.....</b>	<b>315</b>
1. Расчетная схема .....	316
1.1 Характеристики основания.....	316
1.2 Характеристики фундамента .....	316
2. Нагрузки.....	317
3. Расчет основания, выбор размеров подошвы фундамента .....	317
4. Выбор размеров фундамента и расчет арматуры .....	318
5. Вывод результатов .....	319
5.1 Исходные данные .....	319
5.2 Расчетные сочетания усилий .....	320
5.3 Результаты расчета фундамента.....	320
5.4 Расчет основания .....	322
5.5 Расчет железобетонного фундамента .....	322
Литература.....	324
<b>536 – Поле столбчатых фундаментов под железобетонные колонны.....</b>	<b>325</b>
1. Расчетная схема .....	326
1.1 Характеристики основания.....	326
1.2 Характеристики фундамента .....	327
2. Нагрузки.....	327
3. Расчет основания, выбор размеров подошвы фундамента .....	328
4. Выбор размеров фундамента и расчет арматуры .....	329
5. Вывод результатов .....	331
5.1 Исходные данные .....	331
5.2 Расчетные сочетания усилий .....	332
5.3 Расчет основания .....	333
5.4 Результаты расчета фундамента.....	333
5.5 Расчет железобетонного фундамента .....	334
Литература.....	336

<b>545 – Подпорная стенка уголкового профиля .....</b>	<b>337</b>
<b>1. Расчетная схема.....</b>	<b>338</b>
<b>2. Нагрузки .....</b>	<b>339</b>
<b>3. Расчет давления грунта .....</b>	<b>339</b>
3.1 Метод Кульмана.....	340
3.2 Давление грунта для проверки устойчивости .....	340
3.3 Давление грунта для конструктивного расчета стены .....	340
<b>4. Проверка устойчивости угловой подпорной стенки.....</b>	<b>340</b>
<b>5. Расчет прочности железобетонной конструкции стенки .....</b>	<b>341</b>
Литература .....	342
<b>550 – Расчет оснований.....</b>	<b>343</b>
<b>1. Фундамент .....</b>	<b>344</b>
<b>2. Грунт.....</b>	<b>344</b>
<b>3. Нагрузка.....</b>	<b>345</b>
<b>4. Расчет осадки .....</b>	<b>346</b>
<b>5. Расчет просадки .....</b>	<b>348</b>
<b>6. Подбор размеров фундамента.....</b>	<b>349</b>
Литература .....	351
<b>570 – Шпунтовая стенка.....</b>	<b>352</b>
<b>1. Расчетная схема.....</b>	<b>353</b>
<b>2. Нагружение .....</b>	<b>353</b>
<b>3. Расчет давления грунта .....</b>	<b>354</b>
3.1 Определение давления грунта по методу Кульмана .....	354
<b>4. Расчет усилий в сечениях стенки.....</b>	<b>355</b>
4.1 Методы расчета .....	355
4.2 Определение положения воображаемой опоры .....	355
4.3 Определение дополнительной глубины заделки .....	355
4.4 Вычисление требуемой длины профиля .....	355
<b>5. Проектирование несущих элементов стенки.....</b>	<b>356</b>
5.1 Несущие элементы стенки из стали .....	356
5.2 Несущие элементы стенки из железобетона .....	356
<b>6. Дополнительные расчеты и проверки.....</b>	<b>356</b>
<b>7. Пояснительные чертежи .....</b>	<b>356</b>
7.1 Чертеж расчетной схемы .....	356
7.2 Чертеж нагрузок.....	356
7.3 Чертеж давления грунта .....	357
7.4 Чертеж усилий в сечении .....	357
Литература .....	358
<b>580 – Ростверк под колонну.....</b>	<b>359</b>
<b>1. Расчетная схема.....</b>	<b>360</b>
<b>2. Нагрузки .....</b>	<b>360</b>

---

3. Расчет ростверка по прочности нормальных и наклонных сечений.....	361
4. Расчет ростверка на смятие колонной .....	362
5. Расчет ростверка на продавливание.....	363
6. Расчет ростверка по трещиностойкости .....	364
Литература.....	365
<b>785 – Проверка устойчивости стенки балки .....</b>	<b>366</b>
1. Расчетная схема .....	367
2. Расчет по СНиП II-23-81*.....	367
3. Расчет по СП 53-102-2004 .....	370
Литература.....	372
<b>793 – Узел рамы.....</b>	<b>373</b>
1. Конструкция .....	374
2. Нагружение .....	374
3. Проектирование .....	375
3.1 Проверка стенки узла .....	376
3.2 Проектирование ребер жесткости .....	379
3.3 Проектирование несущей накладки.....	381
3.4 Приварка профиля .....	382
Литература.....	384

# 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 **ProjektManager**.

**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. Предусмотрены возможности вставки рисунков и текста, а также преобразования документа в форматы *rtf* и *pdf* для использования в программах Microsoft Word и Adobe Acrobat.

Программа **ProjektManager** предназначена для работы с проектами. Она позволяет организовать хранение документов (текстов, чертежей, расчетных позиций) по проектам и обеспечивает управление ими (удаление, копирование, печать, расчет позиций и др.), имеет функции архивирования и работы с электронной почтой, поддерживает работу нескольких пользователей в локальной сети над одним проектом.

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

## 2. Ввод исходных данных

Для создания новой позиции или открытия существующей позиции используется команда *Новый* или *Открыть* из меню *Позиция* в программе **ProektManager**. При создании новой позиции требуется выбрать расчётную программу. Исходные данные для расчёта задаются в окне *Ввод*. 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, автоматически появляющихся при создании позиции. Шаблоны могут создаваться пользователем. Для создания или изменения шаблонов используется команда *Файл – Позиция – Сохранить как шаблон*. В появляющемся диалоге можно выбрать формирование нового шаблона или изменение существующего.

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

Кроме того, для оформления и дополнения документа можно использовать поставляемые вместе с пакетом **СТАТИКА** сервисные программы для вставки текста, рисунков и других необходимых элементов.

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

Помимо окна *Ввод*, предусмотрены следующие вспомогательные окна:

- Содержание
- Текстовая помощь
- Графическая помощь
- Указания к проекту
- Вывод

Вспомогательными окнами можно управлять с помощью команд из меню *Вид*. В окне *Содержание* отображается структура проекта с разделами ввода. При помощи этого окна можно быстро перейти на требуемое поле ввода. В окне *Текстовая помощь* отображается описание текущего вопроса (параметры, единицы измерения, области допустимых значений, ссылки на пункты норм и др.). В окне *Графическая помощь* отображаются поясняющие рисунки к текущему вопросу, при этом выделяется цветом параметр, соответствующий текущему полю ввода.

При вводе некоторых числовых данных можно использовать команду *Вычисления* из меню *Вставить* для ввода 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.

При вводе некоторых числовых данных также можно использовать команду *Компоновка* из меню *Вставить* для ввода арифметического выражения и поясняющего текста. Допускается ввод нескольких выражений, при этом рассчитанные значения будут суммироваться. В выходном документе будут отображены поясняющий текст и арифметические выражения. Предусмотрена возможность принимать нагрузки из результатов расчета других позиций, например, при расчете фундамента принять опорные реакции из позиции с расчетом колонны. Кроме того, нагрузки могут быть приняты из результатов расчета **MicroFe** и других позиций **Статики**, а также из базы стандартных нагрузок. Для их ввода в текущее поле ввода служит команда *Передать* из меню *Вставить*.

### 3. Расчёт и печать результатов

Сохранение введенных данных осуществляется командой *Сохранить* из меню *Файл*. Расчёт выполняется при помощи команды *Расчёт* из меню *Проект*. Результаты расчёта выводятся в окно *Документ* в форме выходного документа. Команда *Печать* из меню *Файл* позволяет выбрать форму выходного документа.

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) через меню *Проект - Документ*. Пакет **Статика** позволяет напечатать документ в компактной форме (2 или 4 страницы документа на одном листе бумаги).

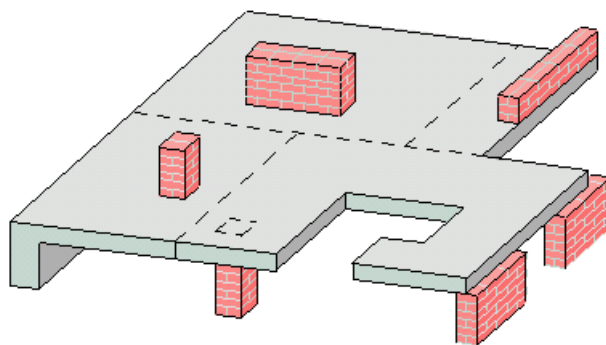
#### 4. Создание проектов и управление ими

Программа **ProjektManager** предназначена для работы с проектами, которые представляют собой группы позиций. Каждый проект имеет разделы *Инфо*, *Статика-COSTRUC*, *Документы*, *Результаты*, а также разделы проектов других расчетных и графических программ пакета **Ing+2011**. В разделе *Инфо* содержится общая информация о проекте. В разделе *Статика-COSTRUC* хранятся расчётные позиции. Раздел *Документы* предназначен для хранения сопутствующих документов проекта (документов Microsoft Word, чертежей AutoCAD и др.), а в разделе *Результаты* хранятся результаты расчета. Проект может быть создан в любой папке файловой системы, за исключением корневого каталога. Проекты могут объединяться в группы. Создавать проекты и группы проектов можно командами из меню *Проект*.

При помощи **ProjektManager** можно также создавать, открывать и рассчитывать позиции. Для этого используются команды из меню *Позиция*. Программа **ProjektManager** даёт возможность провести расчёт сразу нескольких позиций. Для этого необходимо в разделе *Статика* выделить эти позиции и запустить их на расчёт одной командой. **ProjektManager** имеет функцию архивирования, функцию работы с электронной почтой, поддерживает работу нескольких пользователей в локальной сети над одним проектом.

При инсталляции пакета **Статика** создаётся группа *Проекты*, содержащая группу *Примеры* и группу *Другие*, а также проект *Статика* с примерами позиций.

## 200 - Система железобетонных плит





Программа предназначена для расчёта системы прямоугольных плит по СНиП 2.03.01-84\* “Бетонные и железобетонные конструкции” [1], либо по СП 52-101-03 “Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры” [7], либо по СНБ 5.03.01-02 “Бетонные и железобетонные конструкции” [8]. Возможно задание прямоугольных колонн и отверстий. Нагрузки могут быть как сосредоточенными, так и распределёнными. Статический расчёт проводится методом конечных элементов. Расчётные сочетания усилий определяются согласно СНиП 2.01.07-85 “Нагрузки и воздействия” [2]. После определения требуемой арматуры осуществляется конструирование арматуры. Для подобранной арматуры проводится расчёт по трещиностойкости и по деформациям.

## 1. Расчётная схема

Расчётная схема представляет собой набор прямоугольных плит. Расположение плит, колонн и отверстий можно задавать как в глобальной, так и в локальной системе координат (рис. 1,2). Локальная система определяется номером плиты и указанием её вершины. Принятые наименования вершин плиты смотрите на рис. 3. При задании расположения плиты или отверстия необходимо вводить координаты левой нижней вершины плиты или отверстия. В случае задания колонны необходимо вводить координаты её центра.

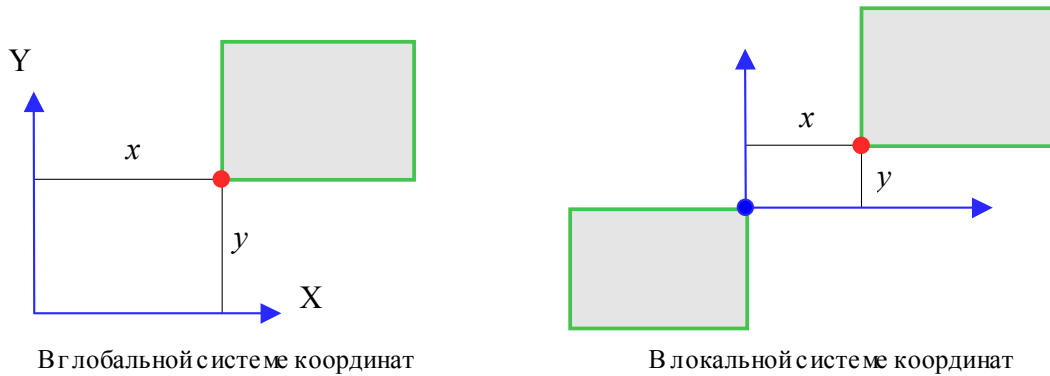


Рис. 1. Пример задания расположения плиты

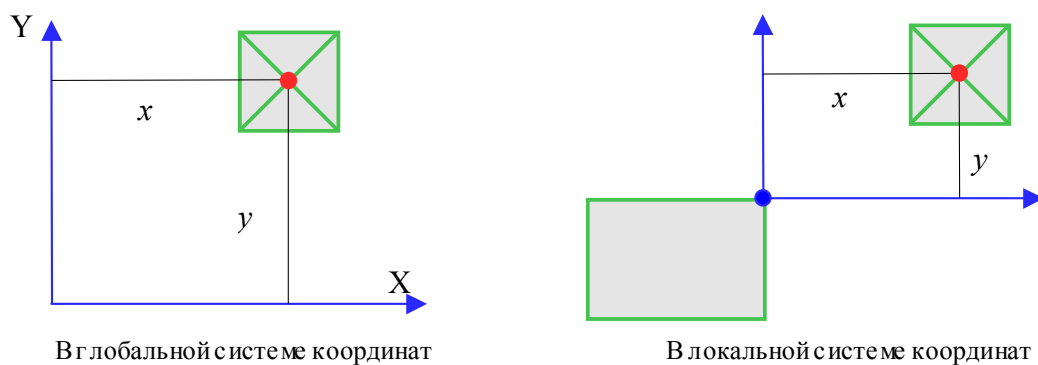


Рис. 2. Пример задания расположения колонны

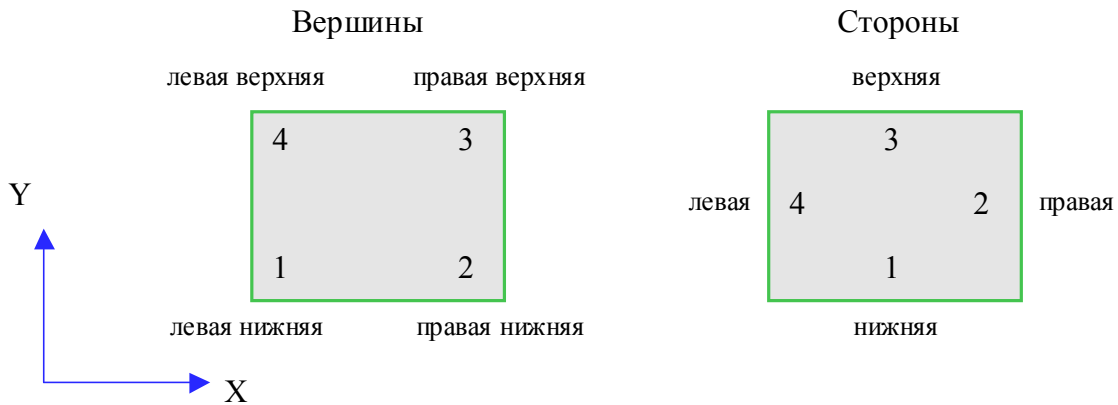


Рис. 3. Система координат. Наименование и нумерация сторон и вершин плиты

Условия закрепления вводятся для каждой стороны плиты. Можно задавать свободное опирание, заделку, свободный край, упругое защемление. Упругое защемление плиты задаётся в процентах. В этом случае жесткость будет рассчитана следующим образом:

$$c = \frac{3Eh^3k}{l(100 - k)} \quad [\text{кНм/м}],$$

где	$h$	-	толщина плиты	[м]
	$k$	-	степень защемления	[%]
	$E$	-	модуль упругости материала плиты	[кН/м <sup>2</sup> ]
	$l$	-	размер плиты в соответствующем направлении	[м]

На отрезках соприкосновения плит (рис.4) по умолчанию принимается условие закрепления V (рис.5). Данное условие может быть изменено ответом на вопрос “Изменить тип соединения соприкасающихся плит?”. Если указывается, что соответствующие плиты связаны, и опора отсутствует, то принимается условие VI (рис.5). Если же указывается, что плиты не связаны, то на отрезке соприкосновения для каждой из плит сохраняются исходные условия закрепления.

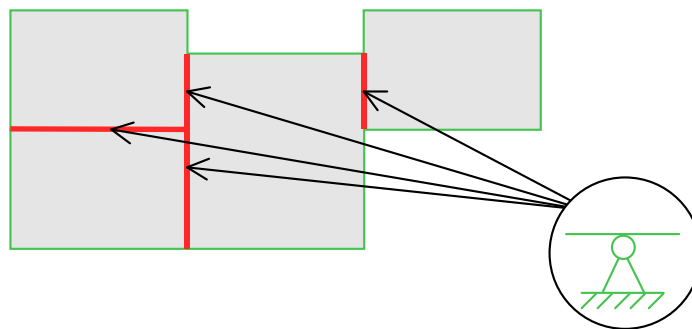


Рис. 4. Отрезки соприкосновения плит




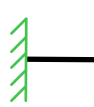
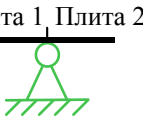
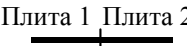






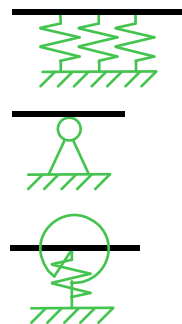
	I свободный край	II свободное опирание	III упругое зашемление	IV заделка	V жёсткое соединение плит, опора	VI жёсткое соединение плит
Тип						
Обозначение на рисунках						

Рис. 5. Возможные условия закрепления плит

Учёт колонн в расчётной схеме возможен по одной из следующих моделей:

- упругое основание
- жёсткая точечная опора в центре колонны
- точечные пружины в центре колонны



Жёсткости соответствующих пружин могут быть рассчитаны по формулам:

упругое основание  $c_z = \frac{E}{H}$  [кН/м<sup>3</sup>]

пружина в направлении прогиба  $c_z = \frac{El_x l_y}{H}$  [кН/м]

пружины в направлениях поворотов  $c_{rx} = \frac{El_y^3 l_x}{4H}$   $c_{ry} = \frac{El_x^3 l_y}{4H}$  [кНм/рад],

где  $H$  - высота колонны [м]

$E$  - модуль упругости материала колонны [кН/м<sup>2</sup>]

$l_x, l_y$  - размеры колонны [м]

В программе можно вводить стенные проёмы. Расположение стенового проёма определяется номером плиты, стороной, расстоянием до проёма и его длиной (рис 6.). Принятые наименования сторон плиты приведены на рис 3. Учёт стеновых проёмов возможен по одной из двух моделей. Первая модель соответствует отсутствию опоры на отрезке стороны плиты. Вторая модель стенового проёма не влияет на условия закрепления плиты и результаты статического расчёта, но для соответствующего отрезка стороны плиты будут отдельно определены и распечатаны опорные реакции.

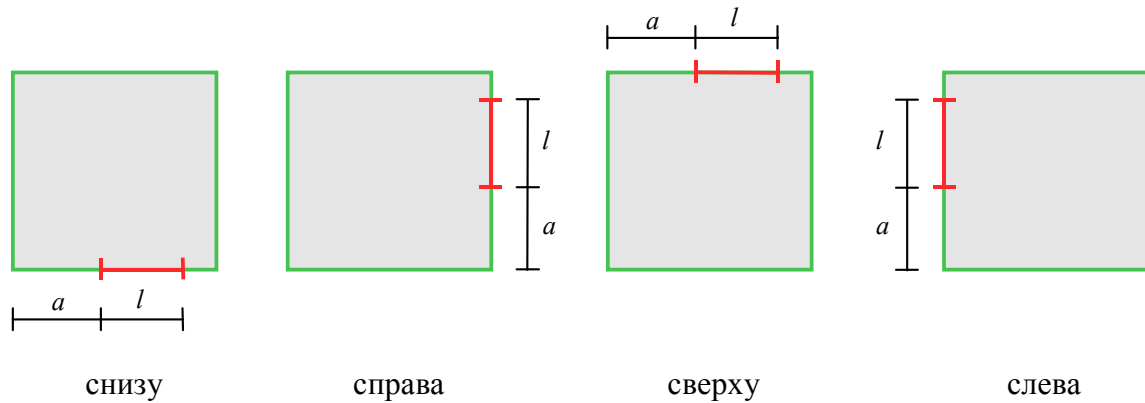


Рис. 6. Задание расположения стенного проёма

## 2. Нагружение

Нагрузки подразделяются согласно [2] на постоянные, длительные, кратковременные и особые. Возможен ввод до 20 нагрузок. Предусмотрены следующие нагрузки: равномерно распределенные по площади, равномерно распределенные по отрезкам, сосредоточенные нагрузки.

Для полосовых и сосредоточенных нагрузок задаётся прямоугольная область их приложения. Расположение этой области задаётся так же, как и расположение плит и колонн (рис.2,3). Ввод отрезков с краевой нагрузкой и краевыми моментами аналогичен вводу стенных проёмов (рис.6). Для всех нагрузок задаются их нормативные значения.

## 3. Определение внутренних силовых факторов

В программе решается задача изгиба системы плит методом конечных элементов. При построении КЭ-модели толщина стен не учитывается. Опоры в направлении  $Z$  принимаются жёсткими. Колонны и стенные проёмы учитываются в соответствии с выбранными моделями. Полосовые и сосредоточенные нагрузки, в зависимости от размеров области приложения, учитываются либо как узловые нагрузки, либо как распределенные по соответствующим элементам. Краевая линейная нагрузка и моменты учитываются как узловые нагрузки.

Значение модуля упругости при отсутствии ввода принимается по [1], таблица 18. Введением специального коэффициента учёта кручения можно моделировать мягкие и жёсткие на кручение плиты. Этот коэффициент задаётся в диапазоне  $\{0..1\}$ . Если он равен нулю, то получаем уравнения изгиба с учетом кручения. Если же он равен единице, то кручение не учитывается ( $M_{xy}$  равен нулю).

Сетка конечных элементов генерируется автоматически. При помощи задания характерного размера конечного элемента можно управлять генерацией сетки. Если получаемая сетка конечных элементов существенно неравномерна, или возникает много «плохих» (узких) элементов, то, изменяя значение характерного шага, можно добиться улучшения сетки. Однако, в большинстве случаев, «плохая» сетка получается из-за некорректной расчётной схемы (например, если расстояния между задаваемыми элементами расчётной схемы существенно меньше характерного размера элемента).

#### 4. Расчётные сочетания усилий

Расчётные сочетания усилий определяются автоматически согласно [2] с учётом введенных пользователем коэффициентов надежности по нагрузке.

Для временных нагрузок возможен учёт их неблагоприятного распределения по пролётам. Если такой учёт требуется, то соответствующая временная нагрузка разбивается на нагрузки, действующие на каждый пролёт, и на каждую из них проводится расчёт. При последующем учёте данной временной нагрузки в сочетаниях усилий выбирается наиболее неблагоприятная комбинация нагружений пролётов.

#### 5. Определение требуемой продольной арматуры

Требуемая продольная арматура определяется в каждом узле КЭ-сетки для всех расчётных сочетаний усилий. При расчете на отдельное сочетание усилий учитываются требования по выбору коэффициента условий работы бетона  $\gamma_{b2}$  согласно [1], таблица 15, позиция 2 в зависимости от состава данного сочетания усилий или аналогичные требования [7], [8].

Усилия для расчета верхней арматуры над опорами определяются с учётом ширины опирания плит (рис.7). Программа позволяет либо учитывать рассчитанные моменты над колонной, либо принимать их равными максимальным моментам по границе этой колонны. Данная возможность особенно важна при моделировании колонн точечными опорами.

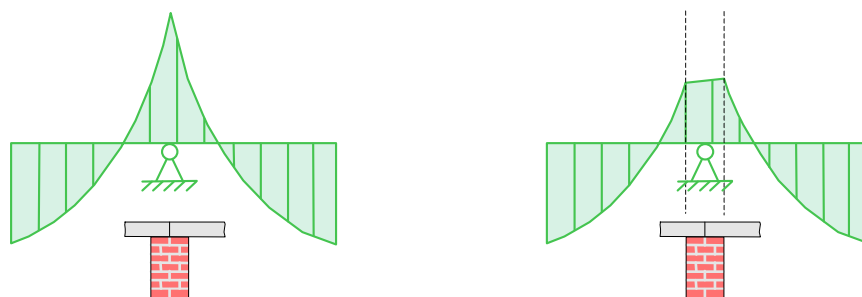


Рис. 7. Учёт ширины опирания при определении моментов

Внутренние усилия, полученные из статического расчёта, включают крутящий момент  $M_{xy}$ . В нормах [1], [7], [8] не указывается способ учёта этого момента, поэтому учёт  $M_{xy}$  при определении расчётных моментов осуществляется по [5]. На рис.8 показан алгоритм учёта  $M_{xy}$  в случае, когда  $M_y > M_x$ . В случае, когда  $M_y < M_x$  учёт крутящего момента аналогичен ( $x \leftrightarrow y$ ).

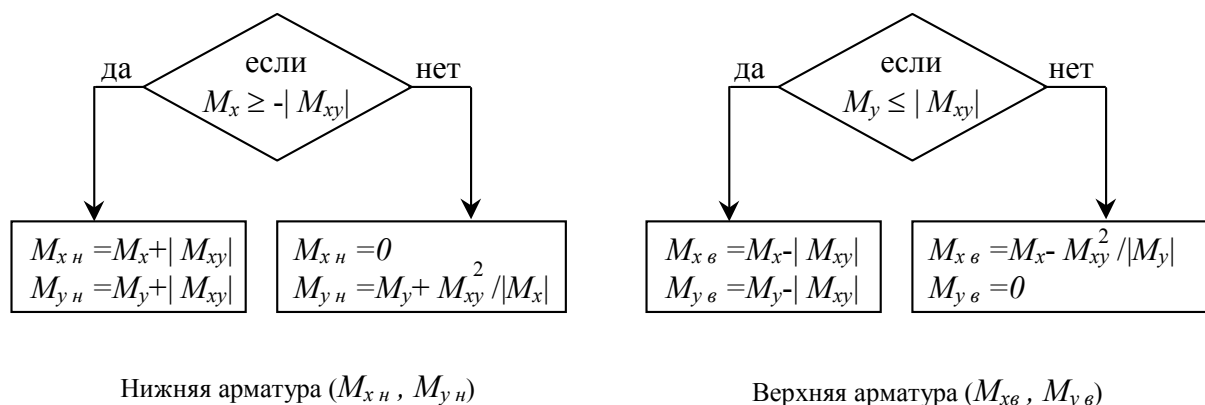


Рис. 8. Учёт моментов  $M_{xy}$  (случай  $M_y > M_x$ )

## 6. Определение требуемой поперечной арматуры

Требуемая поперечная арматура определяется в каждом узле КЭ-сетки на основе расчёта по прочности наклонных сечений на действие поперечной силы. Расчётная поперечная сила в каждом узле вычисляется следующим образом:

$$Q = \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2}$$

Для узлов, находящихся на расстоянии до ближайшей опоры, превышающем  $\varphi_{b2} \cdot h_0 / \varphi_{b3}$ , в качестве длины проекции опасного наклонного сечения берётся расстояние до ближайшей опоры, в качестве поперечной силы берётся значение  $Q$  в данном узле. Для узлов, расположенных вблизи опор, осуществляется поиск опасного наклонного сечения и соответствующего значения  $Q$  (принимается, что опасное наклонное сечение начинается у края опоры). Для найденных  $s$  и  $Q$  осуществляется расчёт поперечной арматуры согласно [1], (75) или [7], (6.66) либо [8], (7.80).

При расчёте поперечной арматуры согласно [1], (84) определяются области, где она не требуется. Согласно [1], (72) определяются области, где несущая способность по наклонной сжатой полосе не может быть обеспечена.

Поперечная арматура в узлах, находящихся внутри области плиты над колонной, принимается равной максимальной арматуре по границе этой области.

## 7. Расчёт на продавливание

Расчёт на продавливание проводится для колонн и областей приложения сосредоточенной нагрузки в соответствии с требованиями по [1], пункт 3.42. Расчёт на продавливание может производиться без учёта или с учётом моментов и эксцентриситетов точки приложения продавливающей силы.

Учёт моментов и эксцентриситетов осуществляется согласно [4]. В этом случае расчёт на продавливание проводится по условному вертикальному сечению, расположенному вокруг опорной площадки на расстоянии  $h_0/2$  от неё. Рабочая высота сечения  $h_0$  определяется как среднее арифметическое соответствующих величин по направлениям  $X$  и  $Y$ . При определении максимальных усилий в условном вертикальном сечении предполагается, что усилия распределены по линейному закону. На участках контура, которые соответствуют свободному краю плиты, усилия полагаются равными нулю (рис.9а). Расчёт на продавливание проводится по максимальному усилию на контуре условного вертикального сечения.

В случае расчёта на продавливание без учёта эксцентриситетов предполагается, что усилия равномерно распределены по периметру  $u_m$  ( $u_m$  - среднее арифметическое величин периметров малого и большого оснований пирамиды продавливания). Малое основание соответствует площадке действия продавливающей силы, большое основание расположено на расстоянии  $h_0$  от него (рис.9б), что соответствует углу наклона боковых граней, равному  $45^\circ$ .

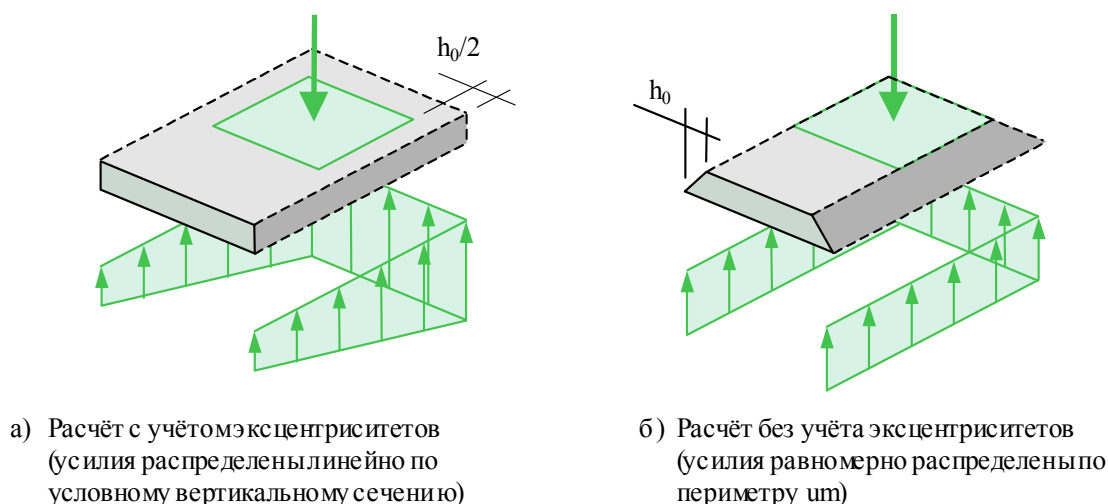


Рис. 9. Распределение усилий при расчёте на продавливание

Согласно [1] пункт 3.42, продавливающая сила  $F$  принимается равной силе, действующей на пирамиду продавливания, за вычетом нагрузок, приложенных к большему основанию пирамиды продавливания и сопротивляющихся продавливанию. При расчёте на продавливание колонн такими нагрузками являются распределённые по плите нагрузки. При расчёте на продавливание для областей приложения сосредоточенных сил такой нагрузкой является реакция упругого основания.

При построении контура пирамиды продавливания возможны два варианта его построения: в виде прямоугольника с углами или со скруглениями (рис.10а). Полученный контур корректируется в том случае, если его часть оказывается вне системы плит. Возможен учет близких к пирамиде продавливания свободных краёв плиты. В этом случае, часть контура заменяется линиями, перпендикулярными свободному краю плиты. Такая замена производится тогда, когда полученный контур (без учёта свободного края) отвечает меньшей несущей способности на продавливание (рис.10б). При построении пирамиды продавливания не учитываются рекомендации [1], связанные со стеснённым продавливанием.

В результате расчёта на продавливание определяется требуемая поперечная арматура. Из расчетов на продавливание с основаниями, расположенными на расстояниях, больших  $h_0$ , определяется область, внутри которой требуется поперечная арматура.

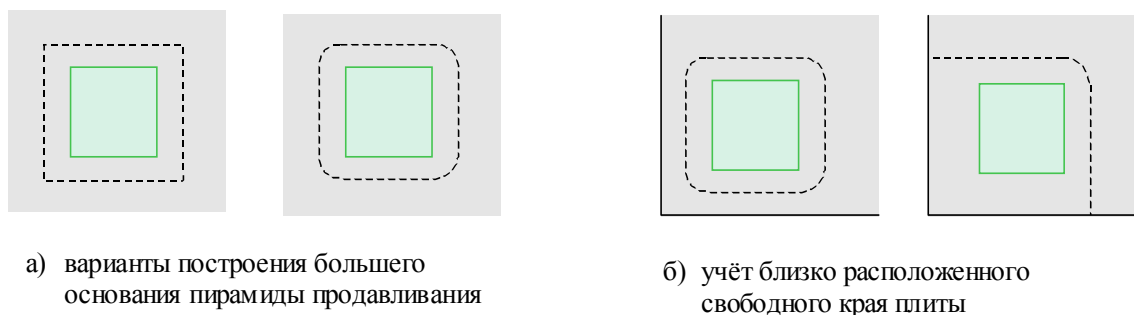


Рис. 10. Параметры расчёта на продавливание

При расчете на продавливание по [7], (6.2.46-52) или [8], (7.4.3), для построения контуров продавливания используются аналогичные правила, изложенные в этих нормах.

## 8. Конструирование

Конструирование нижней и верхней арматуры осуществляется отдельно для каждой плиты.

При конструировании нижней арматуры определяется основная арматура (на всю плиту) и прямоугольные области с дополнительной арматурой. Области с дополнительной арматурой отыскиваются из условия минимума суммарной арматуры. Эти области, как правило, оказываются в местах, где требуемая арматура существенно больше её средних значений по плите. Чаще всего, дополнительная арматура получается в областях, где приложены сосредоточенные силы или решение упругой задачи имеет особенности. Дополнительная арматура вычисляется с учётом её фактического расположения.

При конструировании верхней арматуры определяется прямоугольная область максимальной площади, в которой верхняя арматура не требуется. Вне этого прямоугольника осуществляется подбор арматуры.

## 9. Расчёт по трещиностойкости

Расчёт по трещиностойкости проводится для подобранной арматуры. Расчёт проводится для 3-й категории требований к трещиностойкости. Ширина раскрытия трещин определяется для направлений  $X$  и  $Y$  по отдельности. Учет крутящего момента при расчете по трещиностойкости аналогичен учету при расчёте по прочности (рис.8). Если условия по ширине раскрытия трещин не удовлетворяются, то подбирается арматура, обеспечивающая трещиностойкость сечения.

## 10. Расчёт по деформациям

Расчёт по деформациям проводится для подобранной арматуры. Нормативные сочетания нагрузок, для которых определяются прогибы, выбираются из множества возможных сочетаний по результатам статического расчёта.

Расчёт по деформациям производится методом конечных элементов для системы ортотропных плит. Жёсткости конечных элементов (различные по разным направлениям и по КЭ) определяются в соответствии с [1], (155), (170), или [7], (7.28), (7.29), либо [8], (8.19), (8.29).

## 11. Вывод результатов

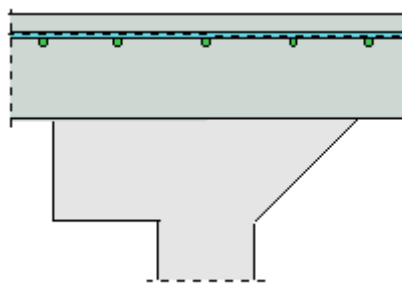
Вывод результатов расчёта осуществляется в текстовом (табличном) и в графическом виде. В выходном документе предусмотрено графическое изображение расчётной схемы, нагрузок, полей усилий, требуемой и подобранной арматуры. Возможно управление объемом выводимой информации, видом и форматом рисунков.



## Литература

1. СНиП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции/Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 80 с.
2. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия/Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1987. – 36 с.
3. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелых и легких бетонов без предварительного напряжения арматуры (к СНиП 2.03.01-84)/ЦНИИпромзданий Госстроя СССР, НИИЖБ Госстроя СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 192 с.
4. Проектирование железобетонных конструкций : Справочное пособие / А.Б.Гольшев, В.Я.Бачинский, В.П.Полищук, А.В.Харченко, И.В.Руденко; Под ред. А.Б.Гольшева. —К. Будивэльнык, 1985. — 496 с.
5. Eurocode No. 2 : Design of concrete structures, Part 1: General Rules and Rules for Buildings, 1989.
6. Руководство по расчёту статически неопределимых железобетонных конструкций/НИИЖБ Госстроя СССР. - М. : Стройиздат, 1975. – 192 с.
7. СП 52-101-03. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры / Госстрой России. – М., 2003.
8. СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2003. – 139 с.

## 270 – Проектирование капителей и банкетов



Программа предназначена для подбора размеров капители или банкетки по расчету на продавливание плиты согласно следующим нормам: СП 52-101-2003 [1], СНиП 2.03.01-84\* [2], СНБ 5.03.01-02 [3], [4], ТКП EN 1992-1-1 [6]. Предусмотрен учет влияния свободных краев плиты. Допускается задание бетона с ненормированной прочностью.

## 1. Расчетная схема и нагрузка

Рассматривается продавливание плиты перекрытия или фундаментной плиты колонной 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  $y$ , а в случае угловой колонны учитывается влияние свободных краев плиты, параллельных осям  $x$  и  $y$  (рис.1).

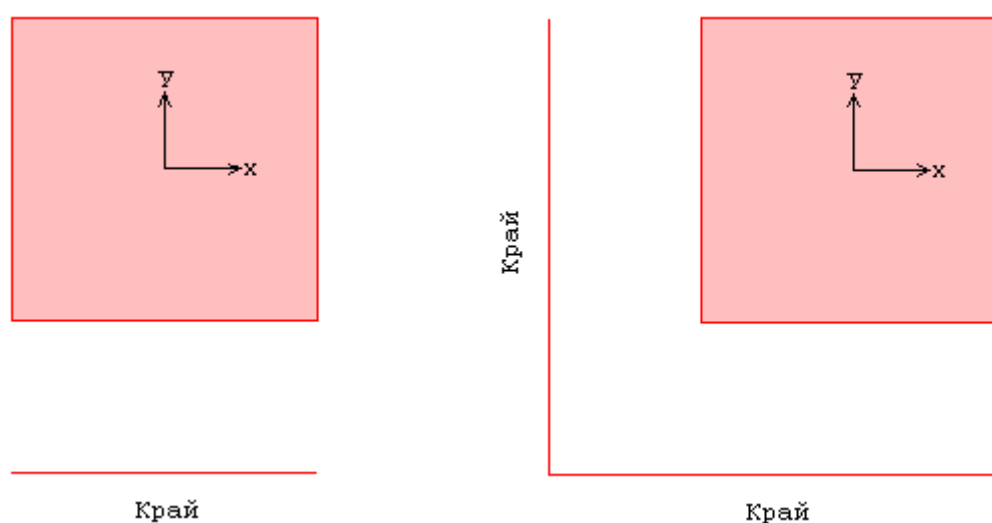


Рис. 1. Краевая и угловая колонны

Для обеспечения несущей способности плиты без поперечного армирования проектируется капитель (банкетка) шириной  $b$  от поверхности колонны и высотой  $h$ . Возможны два вида капителей (банкеток): в виде призмы и в виде пирамиды (рис.2).

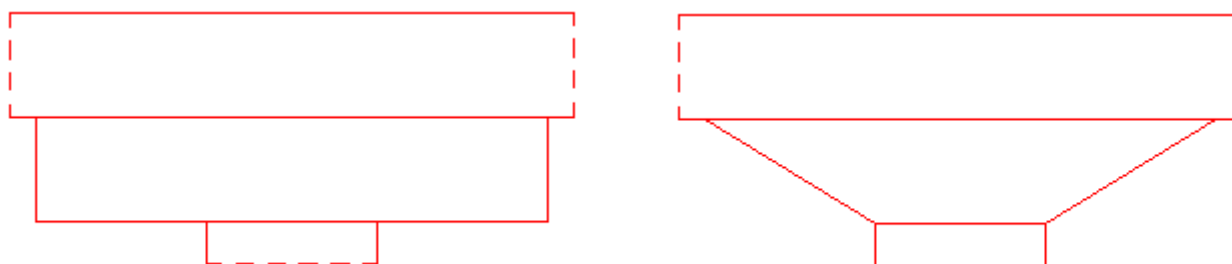


Рис. 2. Виды капителей

Нагрузка на плиту, действующая в пределах сечения колонны, характеризуется значением результирующей силы  $F$ . Неравномерность распределения нагрузки по грузовой площади и, следовательно, неравномерность распределения напряжений в расчетном поперечном сечении плиты при продавливании в расчете по [2] не учитывается.

В расчете по [1] и [6] предусмотрено задание моментов  $M_x, M_y$  относительно осей  $x, y$ . Согласно [1] 6.2.46, при расчете на продавливание следует учитывать только половины

сосредоточенных моментов, действующих на плиту. В расчете по [3] неравномерность распределения напряжений учитывается путем увеличения расчетной продавливающей силы в зависимости от расположения колонны относительно краев плиты. При расчете по [6] коэффициент учета моментов определяется по заданным моментам  $M_x, M_y$ .

## 2. Расчет по СП 52-101-2003

Расчет плиты на продавливание проводится согласно [1], 6.2.46, 6.2.47, 6.2.49. Условие прочности плиты без поперечного армирования имеет вид:

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

$$F_{b,ult} = R_{bt} \cdot u \cdot h_0$$

$$M_{bx,ult} = R_{bt} \cdot W_{bx} \cdot h_0$$

$$M_{by,ult} = R_{bt} \cdot W_{by} \cdot h_0$$

Согласно указаниям 6.2.46 учитывается ограничение:

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

Здесь  $R_{bt}$  - расчетное сопротивление бетона при растяжении (с учетом коэффициента условий работы бетона  $\gamma_b$ ),  $h_0 = (h_{0x} + h_{0y})/2$  - средняя рабочая высота сечения плиты ( $h_{0x}, h_{0y}$  - значения рабочей высоты для продольной арматуры, расположенной вдоль осей  $x, y$ ),  $u$  - периметр расчетного контура, расположенного на расстоянии  $h_0/2$  от площади приложения нагрузки,  $W_{bx}, W_{by}$  - моменты сопротивления расчетного контура, соответствующие изгибающим моментам  $M_x, M_y$  и имеющие размерность квадрата единицы длины. Пример расчетного контура в случае угловой колонны приведен на рис. 3.

В случае краевой или угловой колонны определяются координаты  $x_c, y_c$  центра тяжести расчетного контура и вводятся центральные оси  $x_0, y_0$ . Моменты сопротивления вычисляются относительно центральных осей расчетного контура. К заданным моментам  $M_x, M_y$  прибавляются абсолютные значения моментов  $Fy_c$  и  $Fx_c$  силы  $F$  относительно центральных осей расчетного контура.

При расчете на продавливание фундаментной плиты сила  $F$  уменьшается на величину равнодействующей  $P$  реактивного давления грунта в пределах области, ограниченной контуром, который расположен на расстоянии  $h_0/2$  от расчетного контура. В случае краевой или угловой колонны определяются координаты  $x_p, y_p$  точки приложения силы  $P$  относительно осей  $x, y$ . Так как при расчете применяются центральные оси  $x_0, y_0$ , то к заданным моментам  $M_x, M_y$  прибавляются абсолютные значения моментов:

$$Fy_c + P(y_p - y_c) \text{ и } Fx_c + P(x_p - x_c).$$

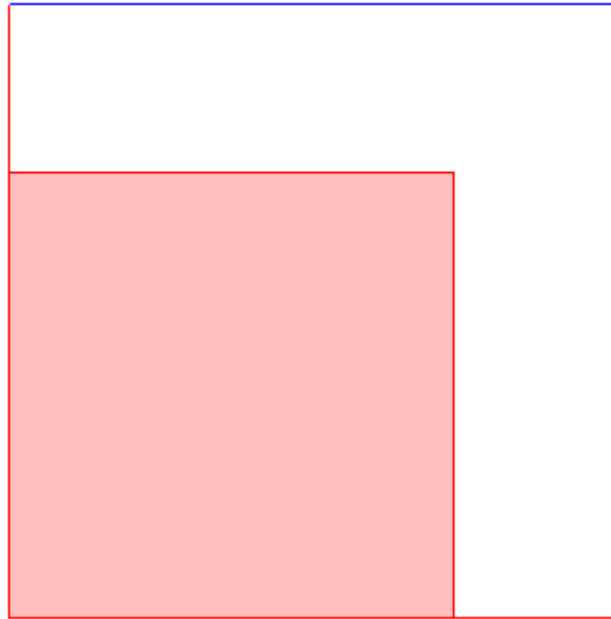


Рис. 3. Пример расчетного контура

Если условие прочности не выполняется, то производится подбор ширины  $b$  и высоты  $h$  капители (банкетки). Программа определяет капитель (банкетку) минимального объема из множества капителей (банкеток), обеспечивающих прочность плиты без поперечного армирования.

Согласно указаниям раздела 8 [5], проверка прочности проводится для одного или двух расчетных контуров. При  $b \leq 1.5h$  рассматривается контур, расположенный на расстоянии  $b + h_0/2$  от поверхности колонны. Для него предельные усилия  $F_{b,ult}$ ,  $M_{bx,ult}$  и  $M_{by,ult}$  определяются при рабочей высоте  $h_0$ . При  $b \geq 1.5(h + h_0)$  рассматриваются два контура. Первый контур расположен на расстоянии  $(h + h_0)/2$  от поверхности колонны. Для него предельные усилия определяются при рабочей высоте  $h + h_0$ , если капитель имеет вид призмы, и при рабочей высоте  $h(1 - \frac{h + h_0}{2b}) + h_0$ , если капитель имеет вид пирамиды. Второй контур расположен на расстоянии  $b + h_0/2$  от поверхности колонны. Для него предельные усилия определяются при рабочей высоте  $h_0$ . При  $1.5h < b < 1.5(h + h_0)$  рассматривается контур, расположенный на расстоянии  $1.5h + h_0/2$ . Для него предельные усилия определяются при рабочей высоте  $h_0$ .

### 3. Расчет по СНиП 2.03.01-84\*

Расчет плиты на продавливание проводится согласно [2], 3.42. Условие прочности плиты без поперечного армирования имеет вид:

$$F \leq F_b$$

Здесь  $F_b = \alpha R_{bt} u_m h_0$ ,  $\alpha$  - коэффициент, зависящий от вида бетона,  $R_{bt}$  - расчетное сопротивление бетона при растяжении (с учетом коэффициента условий работы бетона  $\gamma_b$ ),  $u_m$  - среднее значение периметров оснований пирамиды продавливания,  $h_0 = (h_{0x} + h_{0y})/2$  - средняя рабочая высота сечения плиты ( $h_{0x}, h_{0y}$  - значения рабочей высоты для продольной арматуры, расположенной вдоль осей  $x, y$ ).

При расчете на продавливание фундаментной плиты сила  $F$  уменьшается на величину равнодействующей  $P$  реактивного давления грунта в пределах большего основания пирамиды продавливания.

Если условие прочности не выполняется, то производится подбор ширины  $b$  и высоты  $h$  капители (банкетки). Программа определяет капитель (банкетку) минимального объема из множества капителей (банкеток), обеспечивающих прочность плиты без поперечного армирования.

При расчете в качестве площадей приложения нагрузки могут рассматриваться сечение колонны (площадь 1) и сечение капители на стыке с плитой (площадь 2). Площадь приложения нагрузки является меньшим основанием пирамиды продавливания. При  $b \leq h$  расчет проводится для площади 2. При этом большее основание пирамиды продавливания расположено на расстоянии  $h_0$  от площади 2. Предельное усилие  $F_b$  определяется при рабочей высоте  $h_0$ . При  $b \geq h + h_0$  расчет проводится для площади 1 и площади 2. В первом случае, большее основание пирамиды продавливания расположено на расстоянии  $h + h_0$  от площади 1, а во втором случае – на расстоянии  $h_0$  от площади 2. В первом случае предельное усилие определяется при рабочей высоте  $h + h_0$ , если капитель имеет вид призмы, и при рабочей высоте  $h(1 - \frac{h + h_0}{2b}) + h_0$ , если капитель имеет вид пирамиды. Во втором случае предельное усилие определяется при рабочей высоте  $h_0$ . При  $h < b < h + h_0$  расчет проводится также для площади 1 и площади 2. В первом случае принимается, что большее основание пирамиды продавливания расположено на расстоянии  $b$  от площади 1. Предельное усилие определяется при рабочей высоте  $h_0 = b$ .

#### 4. Расчет по СНБ 5.03.01-02

Расчет плиты на продавливание проводится согласно [3], 7.4.3.1 - 7.4.3.9 с учетом [4]. Условие прочности плиты без поперечного армирования имеет вид:

$$v_{Sd} \leq v_{Rd,c}$$

$$v_{Sd} = \frac{\beta \cdot F}{u}$$

$$v_{Rd,c} = 0.15 \cdot k \cdot (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} \cdot d \geq 0.5 \cdot f_{ctd} \cdot d$$

Здесь  $\beta$  - коэффициент, учитывающий действие моментов ( $1 \leq \beta \leq 1.5$ ),  $u$  - периметр криволинейного расчетного контура,  $d = (d_x + d_y) / 2$  - средняя рабочая высота сечения плиты,  $k = 1 + \sqrt{20/d} \leq 2$  ( $[d] = \text{см}$ ),  $\rho_l = \sqrt{\rho_{lx} \cdot \rho_{ly}} \leq 0.02$  - среднее значение коэффициента продольного армирования,  $f_{ck}$  - нормативное сопротивление бетона при сжатии,  $f_{ctd} = \frac{f_{ctk}}{\gamma_c}$  - расчетное сопротивление бетона при растяжении,  $f_{ctk}$  - нормативное сопротивление бетона при растяжении,  $\gamma_c$  - коэффициент безопасности для бетона. Пример расчетного контура в случае угловой колонны приведен на рис.4.

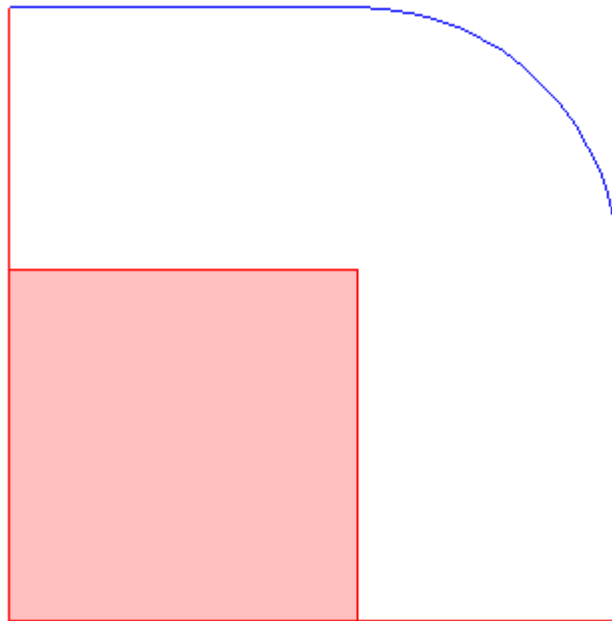


Рис.4. Пример расчетного контура

При расчете на продавливание фундаментной плиты сила  $F$  уменьшается на величину равнодействующей  $P$  реактивного давления грунта в пределах области, ограниченной расчетным контуром.

Если условие прочности не выполняется, то производится подбор ширины  $b$  и высоты  $h$  капители (банкетки). Программа определяет капитель (банкетку) минимального объема из множества капителей (банкеток), обеспечивающих прочность плиты без поперечного армирования.

Проверка прочности проводится для одного или двух расчетных контуров. При  $b \leq 1.5h$  рассматривается контур, расположенный на расстоянии  $b + 1.5d$  от поверхности колонны. Для него предельное усилие  $v_{Rd,c}$  определяется при рабочей высоте  $d$ . При  $b \geq 1.5(h + d)$  рассматриваются два контура. Первый контур расположен на расстоянии  $1.5(h + d)$  от поверхности колонны. Для него предельное усилие определяется при рабочей высоте  $h + d$ , если капитель имеет вид призмы, и при рабочей высоте  $h(1 - \frac{1.5(h + d)}{b}) + d$ , если капитель имеет вид пирамиды. Второй контур расположен на расстоянии  $b + 1.5d$  от поверхности колонны. Для него предельное усилие определяется при рабочей высоте  $d$ . При  $1.5h < b < 1.5(h + d)$  рассматривается контур, расположенный на расстоянии  $1.5(h + d)$  от поверхности колонны. Для него предельное усилие определяется при рабочей высоте  $d$ .

## 5. Расчет по EC2

Расчет плиты на продавливание проводится согласно [6], 6.4. Условие прочности плиты без поперечной арматуры имеет вид:

$$v_{Ed} \leq v_{Rd,c}$$

$$v_{Ed} = \beta \frac{V_{Ed}}{u_1 d}$$

$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} \geq v_{\min}$$

$$v_{\min} = 0.035k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$$

Здесь  $V_{Ed}$  - расчетная продавливающая сила,  $\beta$  - коэффициент учета моментов,  $u_1$  - периметр основного контрольного контура,  $C_{Rd,c} = 0.18/\gamma_c$ ,  $\gamma_c$  - коэффициент безопасности для бетона, зависящий от вида расчетной комбинации воздействий,  $k = 1 + \sqrt{20/d} \leq 2$  ( $[d]$  = см),  $\rho_l = \sqrt{\rho_{lx} \cdot \rho_{ly}} \leq 0.02$  - среднее значение коэффициента продольного армирования,  $f_{ck}$  - прочность бетона при сжатии.

При расчете фундаментной плиты учитывается отпор грунта в пределах площади, ограниченной основным контрольным контуром. В случае краевой или угловой колонны определяются координаты  $x_p, y_p$  точки приложения равнодействующей  $P$  реактивного давления грунта, и сила  $P$  переносится в начало координат с добавлением моментов  $M_{Px}, M_{Py}$ .

В случае краевой или угловой колонны, основной контрольный контур является незамкнутым и характеризуется центром тяжести с координатами  $x_c, y_c$ . В этом случае, производится переход к центральным осям, параллельным исходным осям  $x, y$ . При расчете суммируются абсолютные значения заданных моментов  $M_x, M_y$  и дополнительных моментов, обусловленных переносом продавливающей силы  $F$ .

Коэффициент  $\beta$ , учитывающий моменты, определяется на основе распределения поперечных усилий, которое характеризуется одинаковым абсолютным значением. Основное контрольное сечение разбивается на две части: часть с положительными и часть с отрицательными значениями усилий. Пример распределения поперечных усилий в случае средней колонны показан на рис.6.19 [6].

Формула для определения коэффициента  $\beta$  имеет вид:

$$\beta = 1 + k \frac{M_{Ed}}{V_{Ed}} \cdot \frac{u_1}{W_1}$$

Здесь  $k$  - коэффициент по таблице 6.1,  $W_1$  - момент сопротивления, соответствующий принятому распределению поперечных усилий.

В случае средней колонны прямоугольного сечения со сторонами  $c_1, c_2$ , при действии момента в плоскости, параллельной стороне  $c_1$ , момент сопротивления вычисляется по формуле:

$$W_1 = c_1^2 / 2 + c_1 c_2 + 4c_2 d + 16d^2 + 2\pi d c_1$$

Заменой  $c_1$  на  $c_2$  и наоборот получается формула для случая действия момента в плоскости, параллельной стороне  $c_2$ .

При действии двух моментов допускается применение приближенной формулы (6.43) [6]:

$$\beta = 1 + 1.8 \sqrt{\left(\frac{e_x}{b_y}\right)^2 + \left(\frac{e_y}{b_x}\right)^2}$$

Здесь  $b_x = c_x + 2d$ ,  $b_y = c_y + 2d$  - размеры основного контрольного контура;  $c_x, c_y$  - длины сторон сечения колонны вдоль осей  $x, y$ ;  $e_x = M_y / F$ ,  $e_y = M_x / F$  - эксцентриситеты;  $M_x, M_y$  - расчетные моменты относительно осей  $x, y$ .



В случае средней колонны круглого сечения коэффициент учета моментов вычисляется по формуле:

$$\beta = 1 + 0.6\pi \frac{e}{D + 4d}$$

где  $e = \sqrt{M_x^2 + M_y^2} / F$ .

В случае краевой или угловой колонны коэффициент  $\beta$  определяется численным методом путем отыскания такого распределения поперечных усилий, для которого выполняются условия равновесия при действии расчетных моментов  $k_x M_{x0}$  и  $k_y M_{y0}$ . Коэффициенты  $k_x, k_y$  принимаются по таблице 6.1. В случае угловой колонны при действии двух расчетных моментов дополнительно вычисляется значение  $\beta$  после изменения знака одного из расчетных моментов. Из полученных двух значений выбирается наибольшее.

Следует заметить, что для средней колонны прямоугольного сечения при действии двух моментов значение коэффициента  $\beta$ , определенное численным методом, меньше значений, получаемых по формуле (6.43).

В программе предусмотрена возможность ввода значений коэффициента  $\beta$ , равных 1.15 для средней колонны, 1.4 для краевой колонны, 1.5 для угловой колонны. Согласно 6.4.3 (6), эти значения могут применяться при расчете конструкций, в которых примыкающие пролеты различаются по длине не более, чем на 25%.

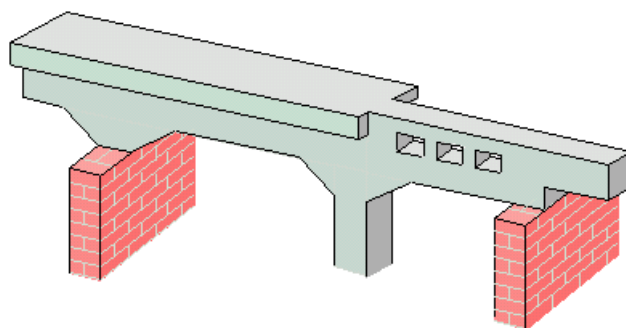
Если условие прочности не выполняется, то производится подбор ширины  $b$  и высоты  $h$  капители (банкетки). Программа определяет капитель (банкетку) минимального объема из множества капителей (банкеток), обеспечивающих прочность плиты без поперечного армирования.

Проверка прочности проводится для одного или двух контрольных контуров. При  $b \leq 2h$  рассматривается контур, расположенный на расстоянии  $b + 2d$  от поверхности колонны. Для него расчетное сопротивление  $\nu_{Rd,c}$  определяется при рабочей высоте  $d$ . При  $b \geq 2(h + d)$  рассматриваются два контура. Первый контур расположен на расстоянии  $2(h + d)$  от поверхности колонны. Для него расчетное сопротивление определяется при рабочей высоте  $h + d$ , если капитель имеет вид призмы, и при рабочей высоте  $h(1 - \frac{2(h + d)}{b}) + d$ , если капитель имеет вид пирамиды. Второй контур расположен на расстоянии  $b + 2d$  от поверхности колонны. Для него расчетное сопротивление определяется при рабочей высоте  $d$ . При  $2h < b < 2(h + d)$  рассматривается контур, расположенный на расстоянии  $2(h + d)$  от поверхности колонны. Для него расчетное сопротивление определяется при рабочей высоте  $d$ .

## Литература

1. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры / ГУП «НИИЖБ», ФГУП ЦПП. – М., 2004.
2. СНиП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 80 с.
3. СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2003. – 139 с.
4. Бетонные и железобетонные конструкции (Изменение №1 СНБ 5.03.01-02)/ Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2004.
5. Разработка методики расчета и конструирования монолитных железобетонных безбалочных перекрытий, фундаментных плит и ростверков на продавливание / Научно-технический отчет ГУП «НИИЖБ» по договору № 709 от 01.10.2002.
6. ТКП EN 1992-1-1: Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций – Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий.

## 300 - Железобетонная балка



Программа предназначена для проектирования и расчёта многопролетной балки согласно СНиП 2.03.01-84\* “Бетонные и железобетонные конструкции” [1], либо по СП 52-101-03 “Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры” [2], либо по СНБ 5.03.01-02 “Бетонные и железобетонные конструкции” [5]. Возможно задание шарниров, вутов, консолей. Предусмотрен расчёт балки как части ребристой плиты. Могут задаваться распределённые и сосредоточенные нагрузки, а также температурные воздействия и осадки опор. Расчётные сочетания усилий определяются автоматически согласно СНиП 2.01.07-85 “Нагрузки и воздействия” [3], либо СНБ 5.03.01-02 “Бетонные и железобетонные конструкции” [5]. Возможен расчёт с перераспределением усилий. Продольная и поперечная арматура определяются на основе расчетов по предельным состояниям первой и второй групп. При конструировании продольной арматуры подбираются диаметры продольных стержней и определяются места их обрыва с учётом длин анкеровки. При конструировании поперечной арматуры определяется расположение хомутов.

## 1. Расчётная схема

Расчётная схема представляет собой многопролетную неразрезную балку с консолями. Максимальное количество пролётов равно 10. Сечение балки может быть прямоугольным или тавровым. Возможно наличие вутов и/или скачков размеров сечения по ширине и по высоте. Для концевых опор можно задавать упругое защемление. В опорах снизу и/или сверху могут учитываться примыкающие стойки, предусмотрен ввод вертикальных пружин в опорах. В пролётах можно задавать шарниры.

Если балка является частью ребристой плиты, то эквивалентная ширина полки рассчитывается согласно пункту 3.16 [1] или 3.2.2.2.4 [2] или 7.1.2.7 [5]. Модуль упругости принимается согласно таблице 18 [1] или рассчитывается по формуле (2.1-5) [2] в соответствии с заданным классом бетона по прочности.

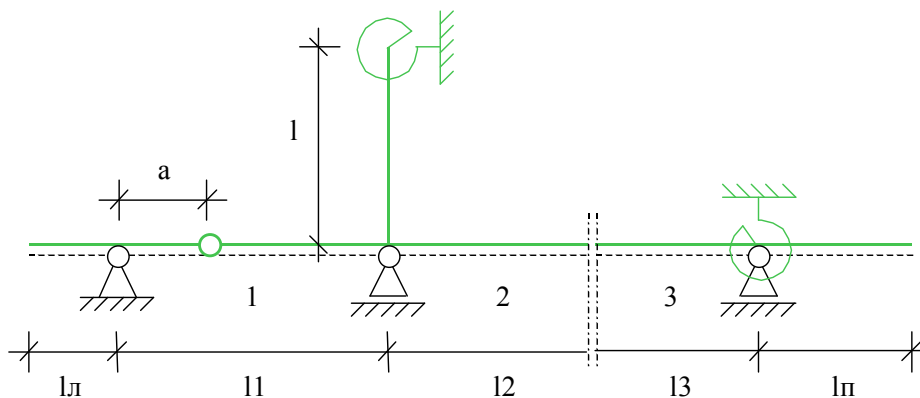


Рис. 1. Пример расчётной схемы

## 2. Нагружение

Различаются постоянные, длительные, кратковременные и особые нагрузки. Возможен учет следующих нагрузок: равномерно распределенных, блочных, трапециевидных, нагрузок на перекрытие, сосредоточенных сил, сосредоточенных моментов, скачка температуры и смещения опор. Длительные и кратковременные нагрузки могут объединяться в группу несочетаемых нагрузок (нагрузки не могут действовать одновременно). Временная нагрузка может задаваться как знакопеременная нагрузка. В этом случае в расчёте учитывается заданная

нагрузка и нагрузка противоположного знака. Для временных нагрузок, действующих на нескольких пролетах возможен учет неблагоприятного распределения нагрузки по пролетам.

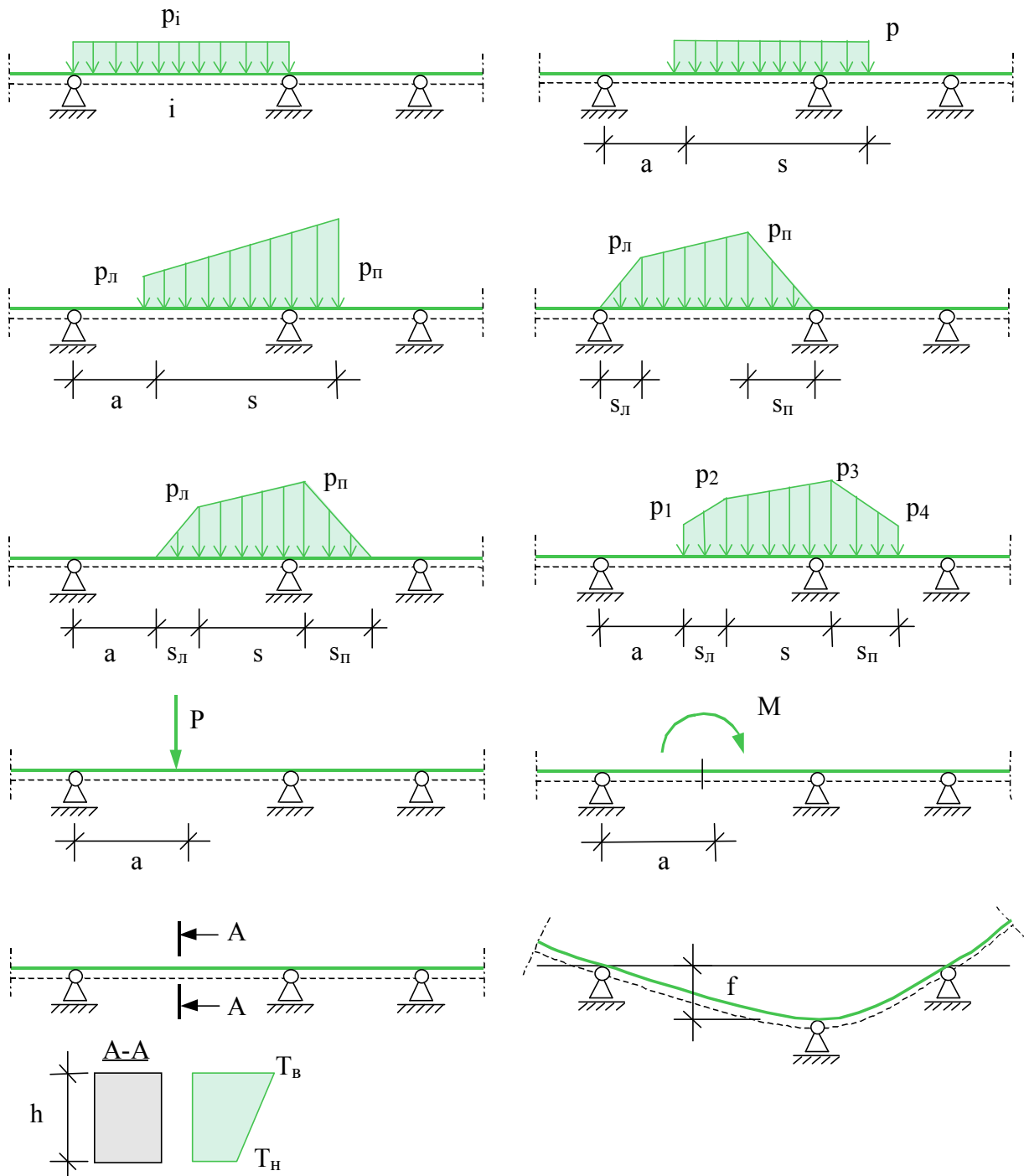


Рис. 2. Виды нагрузок

### 3. Определение внутренних силовых факторов

Усилия определяются методом начальных параметров отдельно для каждой нагрузки. Для временных нагрузок определяются максимальные и минимальные усилия в каждом сечении и

опорные реакции с учётом неблагоприятного распределения нагрузки по пролётам (если учёт необходим).

При обычном линейном расчёте неразрезных балок не учитывается перераспределение усилий вследствие неупругих деформаций бетона и арматуры и образования трещин. Программа позволяет производить перераспределение усилий во внутренних опорах неразрезных балок согласно методу предельного равновесия. Перераспределение происходит путём добавления треугольных эпюр моментов с привлечением двух соседних с опорой пролётов. При перераспределении опорный момент может быть уменьшен не более чем на 30%.

#### **4. Конструирование продольной арматуры**

Программа поддерживает три различные формы конструирования арматуры:

- подбор арматуры без ступенчатой раскладки. В этом случае для каждого пролета и для каждой опоры проводится подбор арматуры в соответствии с максимально требуемой площадью арматуры;
- подбор арматуры с поперечной ступенчатой раскладкой. Длины арматурных стержней и их расположение в пролете и над опорой подбираются таким образом, чтобы площадь арматуры во всех сечениях была как можно ближе к требуемой по расчету. При определении длин продольных стержней учитывается длина анкеровки. Ступенчатая раскладка арматуры над опорами или в пролетах происходит независимо. Если в результате расчета на опорах требуется арматура сжатия, то вместо подбора арматуры с поперечной ступенчатой раскладкой следует использовать подбор арматуры со сквозной ступенчатой раскладкой, так как в этом случае нижняя арматура переходит границы пролетов;
- подбор арматуры со сквозной ступенчатой раскладкой. Аналогичен предыдущему с той лишь разницей, что границы пролетов не являются точками обрыва арматурных стержней.

В местах обрыва стержней и приопорных зонах длина арматурных стержней увеличивается на величину, обеспечивающую прочность на действие изгибающего момента по наклонной трещине.

При подборе продольных стержней учитываются все стандартные диаметры (6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 32, 36, 40). Предусмотрена возможность задать собственный список диаметров. Для каждого пролета можно задать отдельно для верхней и нижней арматуры максимальное количество стержней, минимальный и максимальный диаметры. При подборе арматуры учитываются требования [1], [2] или [3] по минимальным расстояниям между стержнями.

#### **5. Конструирование поперечной арматуры**

Конструирование поперечной арматуры осуществляется на основе расчета наклонных сечений, по предельному состоянию первой группы на действие поперечной силы по наклонной трещине и по предельному состоянию второй группы по образованию и раскрытию трещин, наклонных к продольной оси балки. Определяется площадь поперечной арматуры, требуемая по условиям прочности и трещиностойкости. По заданным диаметрам хомутов, максимальным и минимальным расстояниям между ними подбирается расположение и шаг хомутов.

#### **6. Расчеты по предельным состояниям второй группы**

Программа выполняет расчеты по образованию и раскрытию нормальных и наклонных к оси балки трещин, а также расчет прогибов, обусловленных деформациями изгиба и сдвига.

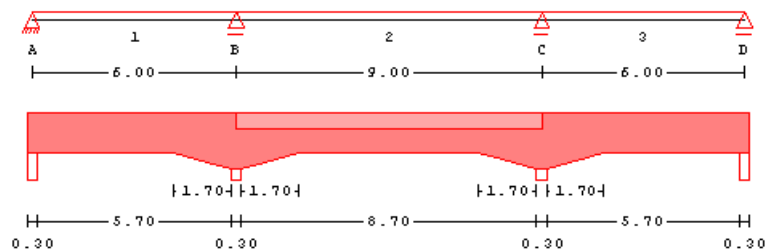
К трещиностойкости балки может быть предъявлено требование недопущения трещин (1-я категория по СНиП 2.03.01-84\*), либо требования по ограничению ширины раскрытия трещин. В последнем случае допустимая ширина раскрытия трещин ограничивается либо требованием соответствующих СНиП (3-я категория по СНиП 2.03.01-84\*, сохранность арматуры или проницаемость конструкции по СП 52-101-03), либо задается пользователем.

При конструировании продольной арматуры происходит наращивание количества и длин стержней, пока предъявленные требования не будут удовлетворены во всех сечениях балки, за исключением участков непосредственно над опорами, которые не принимаются в расчет. Если задано перераспределение усилий, то над опорами устанавливается уменьшенное количество арматуры, поэтому в этом случае требования по ограничению ширины раскрытия трещин в приопорных зонах часто не могут быть выполнены.

## 7. Вывод результатов

Вывод состоит из следующих частей: расчетная схема, нагрузки, результаты расчета внутренних силовых факторов, расчетные сочетания усилий, результаты расчета требуемой арматуры и конструирование арматуры. Вывод любой из этих шести частей можно разрешать или отменять флажками управления выводом. Помимо вывода числовых значений, предусмотрен вывод графики.

Расчетная схема:



Размеры

Пролёт	l	x	bf	hf	b	h	I
	[м]	[м]	[см]	[см]	[см]	[см]	[см <sup>4</sup> ]
1	6.00	0.00			24.0	50.0	250000
		4.15			24.0	50.0	250000
		6.00			24.0	70.0	686000
2	9.00	0.00	224.0	20.0	24.0	70.0	1558770
		1.85	224.0	20.0	24.0	50.0	591026
		7.15	224.0	20.0	24.0	50.0	591026
3	6.00	0.00			24.0	70.0	1558770
		1.85			24.0	50.0	250000
		6.00			24.0	50.0	250000

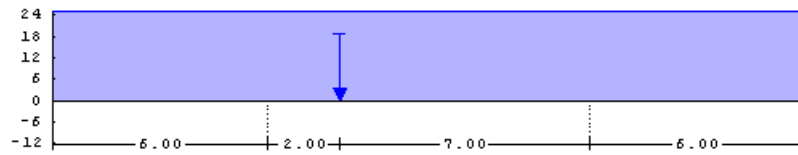
Опоры

Опора	t [см]	Опора	t [см]
A	30.0	B	30.0
C	30.0	D	30.0

Здесь выводятся основные геометрические параметры системы: размеры всех пролетов и стоек, характеристики сечений всех пролетов, т.е. ширина “b” и высота “h” сечения, ширина “bf” и толщина “hf” плиты, ширина опор “t”.

## Нагрузки:

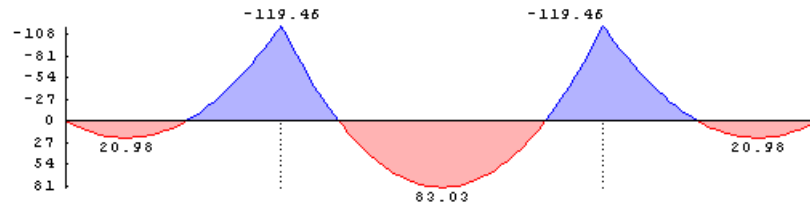
Нагружение 2 постоянные нагрузки



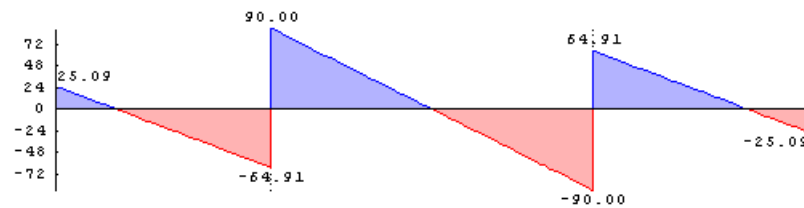
	№	Пролёт	а	в	рл/Р	рп/М
			[м]	[м]	[кН/м, кН, кНм]	
Равномерн.	1	1-3			25.00	
Сосредот.	1	2	2.00		125.00	

## Внутренние силовые факторы:

Нагружение 1 моменты Мупр [кНм]



Нагружение 1 поперечные силы Qупр [кН]



Нагружение 1

Пролёт	х	max Мупр	min Мупр	max Qупр	min Qупр
	[м]	[кНм]	[кНм]	[кН]	[кН]
1	0.00	0.00	0.00	25.09	25.09
	0.15 о	3.59	3.59	22.84	22.84
	0.62 ho	12.59	12.59	15.80	15.80
	1.67 *	20.98	20.98	0.00	0.00
	5.18 ho	-71.35	-71.35	-52.63	-52.63
	5.85 о	-109.90	-109.90	-62.66	-62.66
6.00		-119.47	-119.47	-64.91	-64.91
2	0.00	-119.47	-119.47	90.00	90.00
	0.15 о	-106.19	-106.19	87.00	87.00

Для каждого нагружения выводятся характеристические максимальные и минимальные усилия в сечении Мупр и Qупр. Различие между максимальными и минимальными значениями возникает только для длительных и кратковременных нагрузок и связано с благоприятным и неблагоприятным распределением этих нагрузок по пролетам. Результаты выводятся на границах пролетов, на срезе опор (точки помечены "о"), на расстоянии рабочей высоты сечения от среза опор (точки помечены "ho") и в точках с максимальными значениями внутренних силовых факторов (точки помечены "\*"). Объем вывода может быть увеличен пользователем путем задания дополнительных точек.

Вывод расчетных сочетаний усилий аналогичен выводу результатов упругого расчета внутренних силовых факторов.



### Результаты расчета требуемой арматуры.

Защитный слой	Пролёт	аз н	аз в	аз б	ан	ав
		[мм]	[мм]	[мм]	[см]	[см]
	1	15	20	20	3.1	5.8
	2	20	20	20	5.2	5.2
	3	15	20	20	3.1	5.2

Пролёт 1	x	max M	min M	треб. Азн	треб. Авв
	[м]	[кНм]	[кНм]	[см <sup>2</sup> ]	[см <sup>2</sup> ]
	0.00	0.00	0.00	0.56	0.00
	0.15 o	9.45	9.45	0.57	0.00
	1.51 *	49.99	49.99	3.11	0.00
	4.13	-101.74	-101.74	0.00	7.06
	4.17	-105.69	-105.69	0.00	7.31
	5.85 o	-364.89	-364.89	0.00	18.82
	6.00	-394.05	-394.05	0.00	20.68

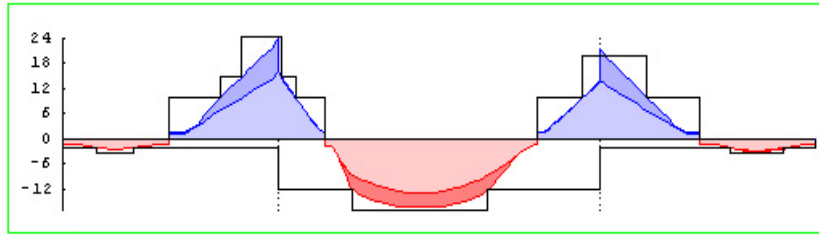
x	c	c0	Qсж	Qb	Q	Азв/в
[м]	[см]	[см]	[кН]	[кН]	[кН]	[см <sup>2</sup> /м]
0.00					66.3	
0.54 ho	39.3	39.3	410.7	195.6	42.5	
4.13	171.7	128.5	387.5	117.8	115.5	4.11
4.17	151.1	88.9	389.2	64.0	86.7	4.11
5.21 ho	192.8	113.4	496.4	81.6	103.3	4.11
6.00					197.7	

Выводятся толщины защитных слоев “аз” снизу, сверху и сбоку и расстояния до центров тяжести арматурных слоев. В таблице расчета продольной арматуры выводятся значения максимальных моментов и расчетные значения площади арматуры. В таблице расчета наклонных сечений выводятся длина проекции наклонного сечения ”с”, длина проекции опасной трещины ”с0”, предельное значение усилия сжатия по наклонной полосе между трещинами “Qсж”, поперечное усилие, воспринимаемое бетоном “Qb”, максимальное значение поперечной силы “Q” и расчетное значение требуемой арматуры.

Конструирование арматуры:

Констр. арматуры  
 $A_z$  [см<sup>2</sup>]  
 $M = 1 : 170$

Продольная арматура



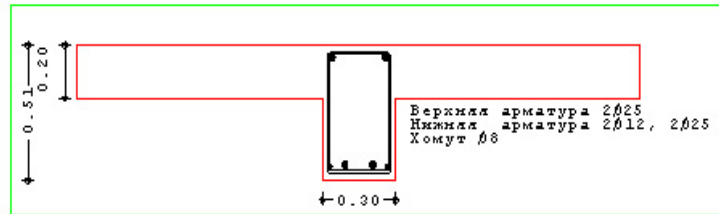
$A_{zw}/s$  [см<sup>2</sup>/м]  
 $M = 1 : 170$

Поперечная арматура



Пролет 2  
 $M = 1 : 25$

схема армирования сечения с координатой  $x = 7.23$



Монтажная арматура нижняя  $n = 2$   $d_s = 12$  мм

Продольн. арм.

пролёт	тип	кол.	$d_s$	ряд	$A_{z1}$	$a$	$l$
опора			[мм]		[см <sup>2</sup> ]	[м]	[м]
1	н	2	12	1	2.26	0.00	21.00
1	н	1	12	1	3.39	0.63	1.65
1	н	4	12	1	7.92	-0.33	6.53
2	н	2	25	1	12.08	-0.37	9.75
2	н	1	25	1	16.99	1.33	5.29
3	н	1	12	1	3.39	3.28	2.18
B	в	2	25	1	9.82	-3.40	5.10
B	в	1	25	1	14.73	-2.32	3.52
B	в	2	25	1	24.54	-1.65	2.70
C	в	2	25	1	9.82	-2.14	5.26
C	в	2	25	1	19.63	-1.17	3.01

Длины приведены с учетом анкеровки

Хомуты

Пролёт	кол.	срез.	$d_s$	$z$	$A_{zw}/s$	$a$	$l$
			[мм]	[см]	[см <sup>2</sup> /м]	[м]	[м]
1	24	2	8	25	4.02	0.00	5.75
2	24	2	8	10	10.05	-0.25	2.40
2	15	2	8	25	4.02	2.15	3.75
2	15	2	8	20	5.03	5.90	3.00
3	25	2	8	25	4.02	-0.10	6.10
Тип арматуры		$d$	длина	кол.	вес		
		[мм]	м		[кН]		
стержневая арматура		25	60.45		2.29		
стержневая арматура		12	29.93		0.26		
хомуты		8		104			

На графиках показаны распределения расчетных значений требуемой арматуры и результаты конструирования. Основная (более светлая) часть эпюры требуемой арматуры соответствует расчету по предельным состояниям первой группы, а более темные добавки – результат расчета по образованию и раскрытию трещин. Схемы армирования сечений выводятся для наиболее нагруженных сечений в пролетах и над опорами, а также в точках, заданных пользователем. В

таблице продольной арматуры приведено количество, диаметры, длины и положение арматурных стержней. В таблице поперечной арматуры приведены диаметр и шаг хомутов, а также начальная координата и протяженность участков с постоянным шагом хомутов. Также приводится сводная таблица расхода арматуры.

Расчет по образованию и раскрытию трещин:

Трещиностойкость Категория требований - 3 асгс1=0.40мм асгс2=0.30мм

Нормальные трещины

Пролет	х [м]	Образование		Продолжительные		Непрод. асгс1 [мм]
		М [кНм]	Мсгс [кНм]	М [кН*м]	асгс2 [мм]	
л.к	0.00	-0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
	1.85 о	-100.5	16.8	-100.5	0.27	0.27
	2.00	-117.5	16.8	-117.5	<b>0.32</b>	0.32
1	0.00	-117.5	16.8	-117.5	<b>0.32</b>	0.32
	0.15 о	-100.7	16.8	-100.7	0.27	0.27
	2.31 *	150.1	16.7	150.1	0.16	0.16
	4.85 о	-194.5	18.3	-194.5	0.21	0.21
	5.00	-230.5	18.3	-230.5	0.25	0.25
2	0.00	-230.5	18.3	-230.5	0.25	0.25

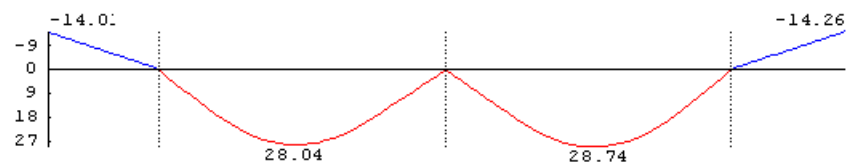
Наклонные трещины

Пролет	х [м]	Образование		Продолжительные		Непрод. асгс1 [мм]
		Q [кН]	Qb [кН]	Q [кН]	асгс2 [мм]	
л.к	0.00	-0.0	106.3			
	1.48h0	-87.0	212.5			
	2.00--	-117.5				
1	0.00--	209.0				
	0.52h0	164.3	210.8			
	4.12ск	-170.1	105.4	-170.1	0.30	0.30
	4.48h0	-201.8	210.8			
	5.00--	-246.5				
2	0.00--	246.5				
	0.52h0	201.8	210.8			
	0.88ск	170.1	105.4	170.1	0.30	0.30
	4.48h0	-164.3	210.8			

В таблицах приведены значения внутренних силовых факторов, вычисленные для расчета продолжительного и непродолжительного раскрытия трещин, соответствующие усилия, необходимые для образования трещин и расчетная ширина их раскрытия в тех сечениях, где действующие усилия превосходят значения начала трещинообразования.

Расчет прогибов:

Прогибы [мм]  
M = 1 : 115



Пролет	х [м]	М [кНм]	Мдл. [кНм]	100/г [1/м]	w [мм]
л.к	0.00 *	-0.0	-0.0	-0.00	-14.01
	2.00	-80.0	-80.0	-0.82	-0.00
	0.00	-80.0	-80.0	-0.82	0.00
1	2.33 *	150.1	150.1	0.95	28.04
	5.00	-164.0	-164.0	-0.94	0.00
	0.00	-164.0	-164.0	-0.94	0.00
2	2.67 *	150.1	150.1	0.95	28.74
	5.00	-80.0	-80.0	-0.82	0.00
	пр.к	0.00 *	-80.0	-80.0	-0.82
	2.00	-0.0	-0.0	-0.00	-14.26

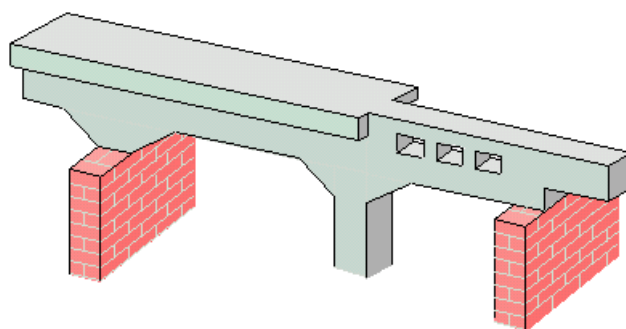
На графике и в таблице приведены расчетные значения прогибов, обусловленных деформациями изгиба и сдвига. Кроме того, в таблице приведены расчетные значения моментов и кривизн.

## Литература

1. СНиП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции/Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 80 с.
2. **СП 52-101-03. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры / Госстрой России. – М., 2003.**
3. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия/Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1987. – 36 с.
4. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелых и легких бетонов без предварительного напряжения арматуры (к СНиП 2.03.01-84)/ЦНИИпромзданий Госстроя СССР, НИИЖБ Госстроя СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 192 с.
5. СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2003. – 139 с.
6. Изменение №1 СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции / Минстройархитектуры Республики Беларусь. – Минск: 2004. – 22 с.

## 301 - Железобетонная балка

с учетом продольной силы и крутящего момента



Программа предназначена для проектирования и расчёта многопролетной балки согласно СНиП 2.03.01-84\* “Бетонные и железобетонные конструкции” [1], либо по СП 52-101-03 “Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры” [2], либо СНБ 5.03.01-02 “Бетонные и железобетонные конструкции” [5]. Возможно задание шарниров, вутов, консолей. Предусмотрен расчёт балки как части ребристой плиты. Могут задаваться распределённые и сосредоточенные нагрузки, а также температурные воздействия и осадки опор. Для ветровых нагрузок задаются статическая и пульсационные составляющие, а для сейсмических – нагрузки от различных форм колебаний. Учитываются продольные усилия и крутящие моменты, которые задаются в виде внутренних силовых факторов. Расчётные сочетания усилий определяются автоматически согласно СНиП 2.01.07-85 “Нагрузки и воздействия” [3], либо СНБ 5.03.01-02 “Бетонные и железобетонные конструкции” [5]. Продольная и поперечная арматура определяются на основе расчетов по предельным состояниям первой и второй групп. При конструировании продольной арматуры подбираются диаметры продольных стержней и определяются места их обрыва с учётом длин анкеровки. При конструировании поперечной арматуры определяется расположение хомутов.

## 1. Расчётная схема

Расчётная схема представляет собой многопролетную неразрезную балку с консолями. Максимальное количество пролётов равно 10. Сечение балки может быть прямоугольным или тавровым. Возможно наличие вутов и/или скачков размеров сечения по ширине и по высоте. Для концевых опор можно задавать упругое защемление. В опорах снизу и/или сверху могут учитываться примыкающие стойки, предусмотрен ввод вертикальных пружин в опорах. В пролётах можно задавать шарниры.

Если балка является частью ребристой плиты, то эквивалентная ширина полки рассчитывается согласно пункту 3.16 [1] или 3.2.2.2.4 [2] или 7.1.2.7 [5]. Модуль упругости принимается согласно таблице 18 [1] или рассчитывается по формуле (2.1-5) [2] в соответствии с заданным классом бетона по прочности.

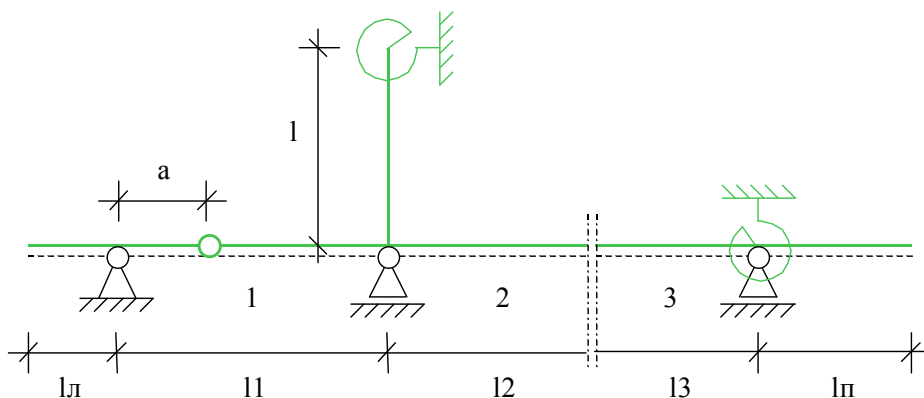


Рис. 1. Пример расчётной схемы

## 2. Нагружение

Различаются постоянные, длительные, кратковременные и особые нагрузки. Кратковременные нагрузки подразделяются на ветровые и прочие, при этом для ветровых нагрузок вводятся статическая и пульсационные составляющие. Особые нагрузки подразделяются на сейсмические и прочие, при этом для сейсмических нагрузок вводятся компоненты, соответствующие различным формам колебаний. Возможен учет следующих нагрузок:

равномерно распределенных, блочных, трапециевидных, нагрузок на перекрытие, сосредоточенных сил, сосредоточенных моментов, скачка температуры и смещения опор. Продольные силы ( $N$ ) и крутящие моменты ( $M_k$ ) вводятся как внутренние силовые факторы отрезками (до 40) трапеций. Длительные и кратковременные нагрузки могут объединяться в группу несочетаемых нагрузок (нагрузки не могут действовать одновременно). Временная нагрузка может задаваться как знакопеременная нагрузка. В этом случае в расчёте учитывается заданная нагрузка и нагрузка противоположного знака. Для временных нагрузок, действующих на нескольких пролетах, возможен учет неблагоприятного распределения нагрузки по пролетам. Кроме того, возможно задание готовых комбинаций нагрузок.

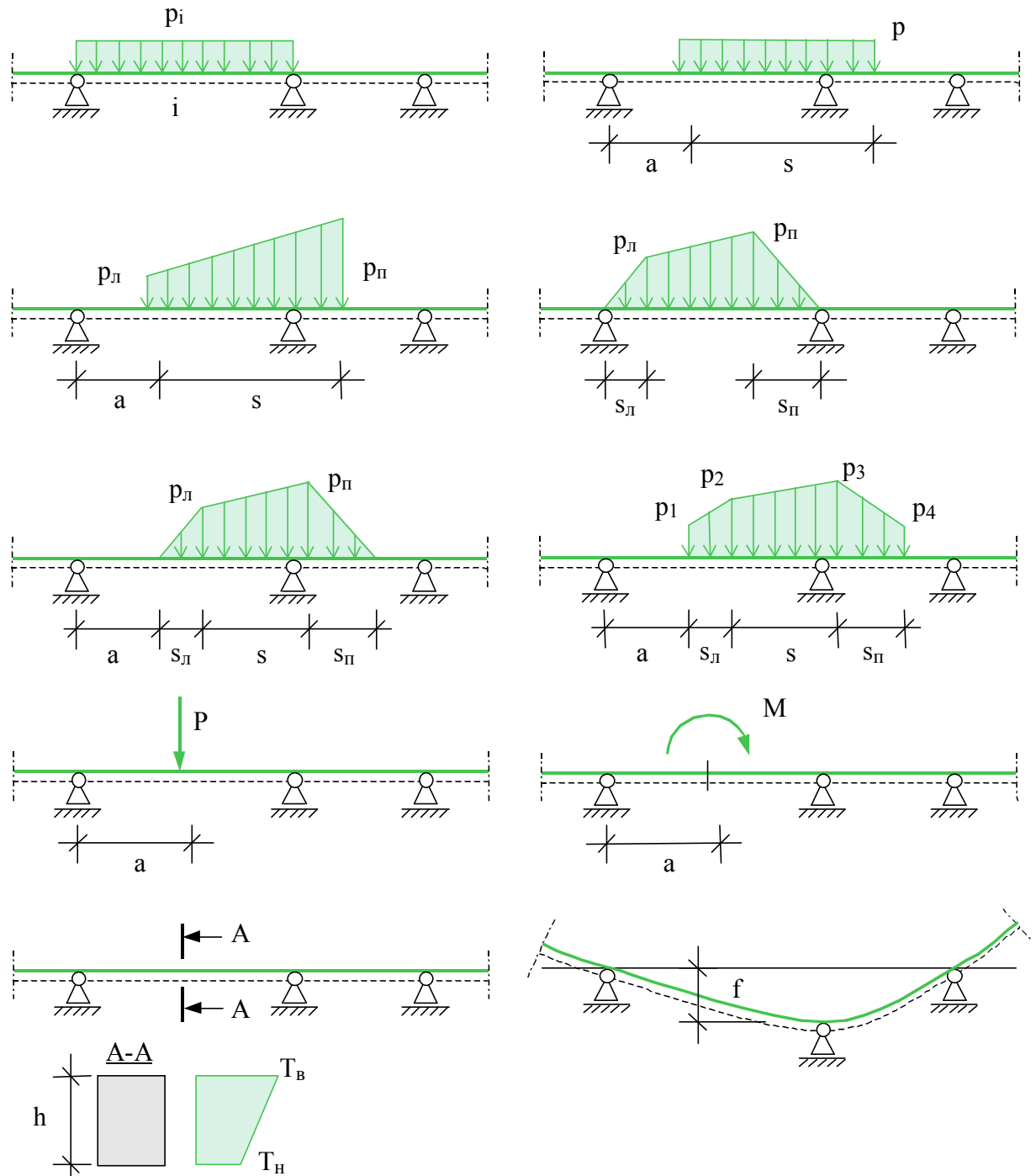


Рис. 2. Виды нагрузок

### 3. Определение внутренних силовых факторов

Усилия - изгибающий момент ( $M$ ) и поперечная сила ( $Q$ ) - определяются методом начальных параметров отдельно для каждой нагрузки. Для временных нагрузок определяются максимальные и минимальные усилия в каждом сечении и опорные реакции с учётом неблагоприятного распределения нагрузки по пролётам (если учет необходим). Для ветровой нагрузки в каждом сечении суммируются усилия от статической составляющей и векторной суммы пульсационных. Для сейсмической нагрузки усилия в каждом сечении получаются как векторная сумма усилий от различных форм колебаний.

### 4. Расчет требуемой арматуры

При расчете требуемой продольной арматуры для каждого сечения в координатной плоскости  $M$ ,  $N$  строится выпуклый многоугольник, охватывающий все возможные расчетные сочетания усилий (PCY), и для вершин этого многоугольника проводятся расчеты требуемой арматуры по выбранным нормам. Затем аналогичный многоугольник строится в пространстве  $M$ ,  $M_k$ , проводится проверка прочности пространственного сечения для схем с расположением сжатой зоны у сжатого и растянутого от изгиба краев сечения, и площадь требуемой продольной арматуры увеличивается до необходимой величины.

При расчете требуемой поперечной арматуры для каждого сечения в координатной плоскости  $Q$ ,  $N$  строится выпуклый многоугольник, охватывающий все возможные расчетные сочетания усилий (PCY), и для вершин этого многоугольника проводятся расчеты требуемой арматуры по выбранным нормам. Затем аналогичный многоугольник строится в пространстве  $Q$ ,  $M_k$ , проводится проверка прочности пространственного сечения для схемы с расположением сжатой зоны у бокового края сечения, и площадь требуемой поперечной арматуры увеличивается до необходимой величины.

### 5. Конструирование продольной арматуры

Программа поддерживает три различные формы конструирования арматуры:

- подбор арматуры без ступенчатой раскладки. В этом случае для каждого пролета и для каждой опоры проводится подбор арматуры в соответствии с максимально требуемой площадью арматуры.
- подбор арматуры с поперечной ступенчатой раскладкой. Длины арматурных стержней и их расположение в пролете и над опорой подбираются таким образом, чтобы площадь арматуры во всех сечениях была как можно ближе к требуемой по расчету. При определении длин продольных стержней учитывается длина анкеровки. Ступенчатая раскладка арматуры над опорами или в пролетах происходит независимо. Если в результате расчета на опорах требуется арматура сжатия, то вместо подбора арматуры с поперечной ступенчатой раскладкой следует использовать подбор арматуры со сквозной ступенчатой раскладкой, так как в этом случае нижняя арматура переходит границы пролетов.
- подбор арматуры со сквозной ступенчатой раскладкой. Аналогичен предыдущему с той лишь разницей, что границы пролетов не являются точками обрыва арматурных стержней.

В местах обрыва стержней и приопорных зонах длина арматурных стержней увеличивается на величину, обеспечивающую прочность на действие изгибающего момента по наклонной трещине.



При подборе продольных стержней учитываются все стандартные диаметры (6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 32, 36, 40). Предусмотрена возможность задать собственный список диаметров. Для каждого пролета можно задать отдельно для верхней и нижней арматуры максимальное количество стержней, минимальный и максимальный диаметры. При подборе арматуры учитываются требования [1], [2] или [3] по минимальным расстояниям между стержнями. После подбора арматуры, во всех сечениях проводится повторная проверка на действие крутящего момента по схеме с расположением сжатой зоны у бокового края сечения и, при необходимости, выводится информация о дополнительной продольной арматуре, расположенной у боковых граней балки.

## **6. Конструирование поперечной арматуры**

Конструирование поперечной арматуры осуществляется на основе расчета наклонных сечений по предельному состоянию первой группы на действие поперечной силы по наклонной трещине и по предельному состоянию второй группы по образованию и раскрытию трещин, наклонных к продольной оси балки. Определяется площадь поперечной арматуры, требуемая по условиям прочности и трещиностойкости. По заданным диаметрам хомутов, максимальным и минимальным расстояниям между ними подбирается расположение и шаг хомутов.

## **7. Расчеты по предельным состояниям второй группы**

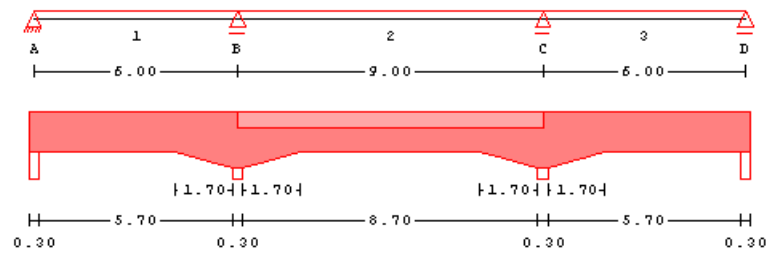
Программа выполняет расчеты по образованию и раскрытию нормальных и наклонных к оси балки трещин, а также расчет прогибов, обусловленных деформациями изгиба и сдвига. К трещиностойкости балки может быть предъявлено требование недопущения трещин (1-я категория по СНиП 2.03.01-84\*), либо требования по ограничению ширины раскрытия трещин. В последнем случае, допустимая ширина раскрытия трещин ограничивается либо требованием соответствующих СНиП (3-я категория по СНиП 2.03.01-84\*, сохранность арматуры или проницаемость конструкции по СП 52-101-03), либо задается пользователем.

При конструировании продольной арматуры происходит наращивание количества и длин стержней, пока предъявленные требования не будут удовлетворены во всех сечениях балки, за исключением участков непосредственно над опорами, которые не принимаются в расчет.

## **8. Вывод результатов**

Вывод состоит из следующих частей: расчетная схема, нагрузки, результаты расчета внутренних силовых факторов, расчетные сочетания усилий, результаты расчета требуемой арматуры и конструирование арматуры. Вывод любой из этих шести частей можно разрешать или отменять флажками управления выводом. Помимо вывода числовых значений, предусмотрен и вывод графики.

Расчетная схема:



Размеры

Пролёт	l	x	bf	hf	b	h	I
	[м]	[м]	[см]	[см]	[см]	[см]	[см <sup>4</sup> ]
1	6.00	0.00			24.0	50.0	250000
		4.15			24.0	50.0	250000
		6.00			24.0	70.0	686000
2	9.00	0.00	224.0	20.0	24.0	70.0	1558770
		1.85	224.0	20.0	24.0	50.0	591026
		7.15	224.0	20.0	24.0	50.0	591026
3	6.00	0.00	224.0	20.0	24.0	70.0	1558770
		1.85			24.0	50.0	250000
		6.00			24.0	50.0	250000

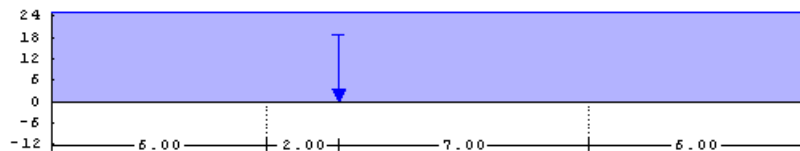
Опоры

Опора	t [см]	Опора	t [см]
A	30.0	B	30.0
C	30.0	D	30.0

Здесь выводятся основные геометрические параметры системы: размеры всех пролетов и стоек, характеристики сечений всех пролетов, т.е. ширина “b” и высота “h” сечения, ширина “bf” и толщина “hf” плиты, ширина опор “t”.

Нагрузки:

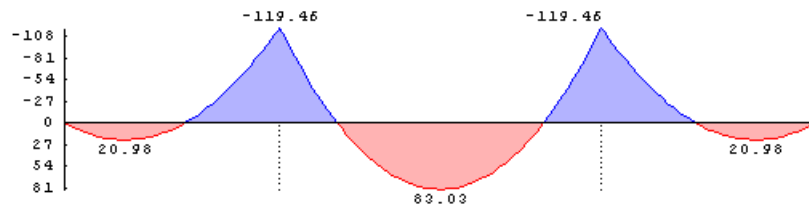
Напряжение 2 постоянные нагрузки



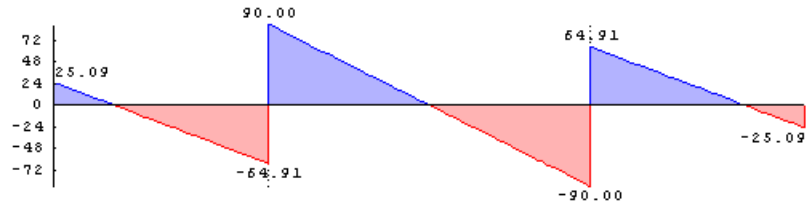
N.	Пролёт	a	z	рл/Р	рп/М
		[м]	[м]	[кН/м, кН, кНм]	
Равномерн.	1	1-3		25.00	
Сосредот.	1	2	2.00	125.00	

### Внутренние силовые факторы:

Нагружение 1 моменты Мупр [кНм]



Нагружение 1 поперечные силы Qупр [кН]



Нагружение 1

Пролёт	x	max Мупр	min Мупр	max Qупр	min Qупр
	[м]	[кНм]	[кНм]	[кН]	[кН]
1	0.00	0.00	0.00	25.09	25.09
	0.15 o	3.59	3.59	22.84	22.84
	0.62 ho	12.59	12.59	15.80	15.80
	1.67 *	20.98	20.98	0.00	0.00
	5.18 ho	-71.35	-71.35	-52.63	-52.63
	6.00 o	-109.90	-109.90	-62.66	-62.66
2	0.00	-119.47	-119.47	-64.91	-64.91
	0.15 o	-106.19	-106.19	90.00	90.00

Для каждого нагружения выводятся характеристические максимальные и минимальные усилия в сечении Мупр и Qупр. Различие между максимальными и минимальными значениями возникает только для длительных и кратковременных нагрузок и связано с благоприятным и неблагоприятным распределением этих нагрузок по пролетам. Результаты выводятся на границах пролетов, на срезе опор (точки помечены “o”), на расстоянии рабочей высоты сечения от среза опор (точки помечены “ho”) и в точках с максимальными значениями внутренних силовых факторов (точки помечены “\*”). Объем вывода может быть увеличен пользователем путем задания дополнительных точек.

Если заданы продольные силы и/или крутящие моменты, то они выводятся аналогично.

Вывод расчетных сочетаний усилий аналогичен выводу результатов упругого расчета внутренних силовых факторов.

### Результаты расчета требуемой арматуры.

Защитный слой

Пролёт	аз н [мм]	аз в [мм]	аз б [мм]	ан [см]	ав [см]
1	15	20	20	3.1	5.8
2	20	20	20	5.2	5.2
3	15	20	20	3.1	5.2

Пролёт 1

x [м]	max M [кНм]	min M [кНм]	треб. Азн [см <sup>2</sup> ]	треб. Азв [см <sup>2</sup> ]
0.00	0.00	0.00	0.56	0.00
0.15 о	9.45	9.45	0.57	0.00
1.51 *	49.99	49.99	3.11	0.00
4.13	-101.74	-101.74	0.00	7.06
4.17	-105.69	-105.69	0.00	7.31
5.85 о	-364.89	-364.89	0.00	18.82
6.00	-394.05	-394.05	0.00	20.68

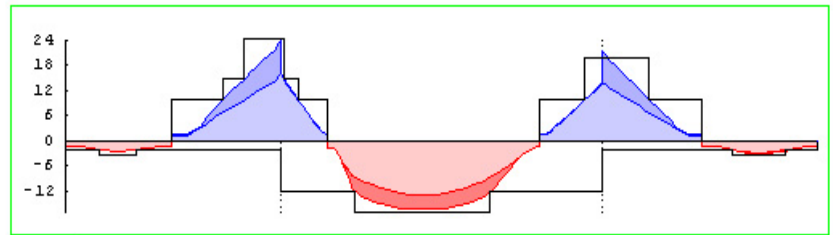
x [м]	c [см]	c0 [см]	Qсж [кН]	Qb [кН]	Q [кН]	Азв/з [см <sup>2</sup> /м]
0.00					66.3	
0.54 ho	39.3	39.3	410.7	195.6	42.5	
4.13	171.7	128.5	387.5	117.8	115.5	4.11
4.17	151.1	88.9	389.2	64.0	86.7	4.11
5.21 ho	192.8	113.4	496.4	81.6	103.3	4.11
6.00					197.7	

Выводятся толщины защитных слоев “аз” снизу, сверху и сбоку и расстояния до центров тяжести арматурных слоев. В таблице расчета продольной арматуры выводятся значения максимальных моментов и расчетные значения площади арматуры. В таблице расчета наклонных сечений выводятся длина проекции наклонного сечения “с”, длина проекции опасной трещины “с0”, предельное значение усилия сжатия по наклонной полосе между трещинами “Qсж”, поперечное усилие, воспринимаемое бетоном “Qb”, максимальное значение поперечной силы “Q” и расчетное значение требуемой арматуры.

## Конструирование арматуры:

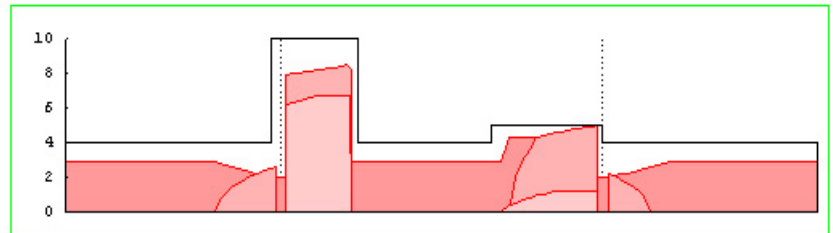
Констр. арматуры  
 $A_s$  [см<sup>2</sup>]  
 $M = 1 : 170$

Продольная арматура

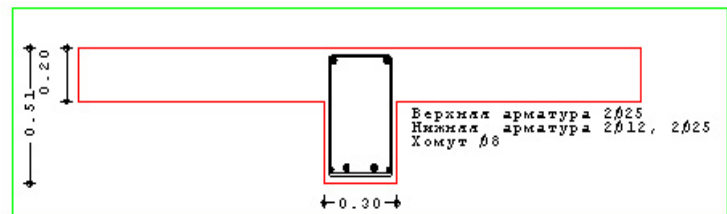


$A_{sw}/s$  [см<sup>2</sup>/м]  
 $M = 1 : 170$

Поперечная арматура



Пролет 2  
 $M = 1 : 25$

схема армирования сечения с координатой  $x = 7.23$ Монтажная арматура нижняя  $n = 2$   $d_s = 12$  мм

Продольн. арм.

пролёт	тип	кол.	$d_s$	ряд	$A_{s1}$	$a$	$l$
опора			[мм]		[см <sup>2</sup> ]	[м]	[м]
1	н	2	12	1	2.26	0.00	21.00
1	н	1	12	1	3.39	0.63	1.65
1	н	4	12	1	7.92	-0.33	6.53
2	н	2	25	1	12.08	-0.37	9.75
2	н	1	25	1	16.99	1.33	5.29
3	н	1	12	1	3.39	3.28	2.18
В	в	2	25	1	9.82	-3.40	5.10
В	в	1	25	1	14.73	-2.32	3.52
В	в	2	25	1	24.54	-1.65	2.70
С	в	2	25	1	9.82	-2.14	5.26
С	в	2	25	1	19.63	-1.17	3.01

Длины приведены с учетом анкеровки

Хомуты

Пролёт	кол.	срез.	$d_s$	$s$	$A_{sw}/s$	$a$	$l$
			[мм]	[см]	[см <sup>2</sup> /м]	[м]	[м]
1	24	2	8	25	4.02	0.00	5.75
2	24	2	8	10	10.05	-0.25	2.40
2	15	2	8	25	4.02	2.15	3.75
2	15	2	8	20	5.03	5.90	3.00
3	25	2	8	25	4.02	-0.10	6.10
Тип арматуры			$d$	длина	кол.	вес	
			[мм]	м		[кН]	
стержневая арматура			25	60.45		2.29	
стержневая арматура			12	29.93		0.26	
хомуты			8		104		

На графиках показаны распределения расчетных значений требуемой арматуры и результаты конструирования. Основная (более светлая) часть эпюры требуемой арматуры соответствует расчету по предельным состояниям первой группы, а более темные добавки – результат расчета по образованию и раскрытию трещин. Схемы армирования сечений выводятся для наиболее нагруженных сечений в пролетах и над опорами, а также в точках, заданных пользователем. В таблице продольной арматуры приведено количество, диаметры, длины и положение

арматурных стержней. В таблице поперечной арматуры приведены диаметр и шаг хомутов, а также начальная координата и протяженность участков с постоянным шагом хомутов. Также приводится сводная таблица расхода арматуры.

### Расчет по образованию и раскрытию трещин:

Трещиностойкость Категория требований - 3  $асгс1=0.40\text{мм}$   $асгс2=0.30\text{мм}$

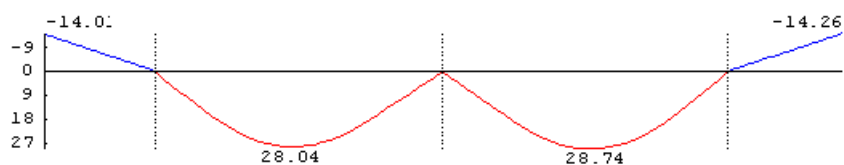
Нормальные трещины		Образование		Продолжительные		Непрод.
Про-лет	х [м]	М [кНм]	Мсгс [кНм]	М [кН*м]	асгс2 [мм]	асгс1 [мм]
л.к	0.00	-0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
	1.85 о	-100.5	16.8	-100.5	0.27	0.27
	2.00	-117.5	16.8	-117.5	<b>0.32</b>	0.32
1	0.00	-117.5	16.8	-117.5	<b>0.32</b>	0.32
	0.15 о	-100.7	16.8	-100.7	0.27	0.27
	2.31 *	150.1	16.7	150.1	0.16	0.16
	4.85 о	-194.5	18.3	-194.5	0.21	0.21
	5.00	-230.5	18.3	-230.5	0.25	0.25
2	0.00	-230.5	18.3	-230.5	0.25	0.25

Наклонные трещины		Образование		Продолжительные		Непрод.
Про-лет	х [м]	Q [кН]	Qb [кН]	Q [кН]	асгс2 [мм]	асгс1 [мм]
л.к	0.00	-0.0	106.3			
	1.48h0	-87.0	212.5			
	2.00--	-117.5				
1	0.00--	209.0				
	0.52h0	164.3	210.8			
	4.12ск	-170.1	105.4	-170.1	0.30	0.30
	4.48h0	-201.8	210.8			
	5.00--	-246.5				
2	0.00--	246.5				
	0.52h0	201.8	210.8			
	0.88ск	170.1	105.4	170.1	0.30	0.30
	4.48h0	-164.3	210.8			

В таблицах приведены значения внутренних силовых факторов, вычисленные для расчета продолжительного и непродолжительного раскрытия трещин, соответствующие усилия, необходимые для образования трещин и расчетная ширина их раскрытия в тех сечениях, где действующие усилия превосходят значения начала трещинообразования.

### Расчет прогибов:

Прогибы [мм]  
M = 1 : 115



Пролет	х [м]	М [кНм]	Мдл. [кНм]	100/r [1/м]	w [мм]
л.к	0.00 *	-0.0	-0.0	-0.00	-14.01
	2.00	-80.0	-80.0	-0.82	-0.00
1	0.00	-80.0	-80.0	-0.82	0.00
	2.33 *	150.1	150.1	0.95	28.04
	5.00	-164.0	-164.0	-0.94	0.00
2	0.00	-164.0	-164.0	-0.94	0.00
	2.67 *	150.1	150.1	0.95	28.74
	5.00	-80.0	-80.0	-0.82	0.00
пр.к	0.00 *	-80.0	-80.0	-0.82	-0.00
	2.00	-0.0	-0.0	-0.00	-14.26

---

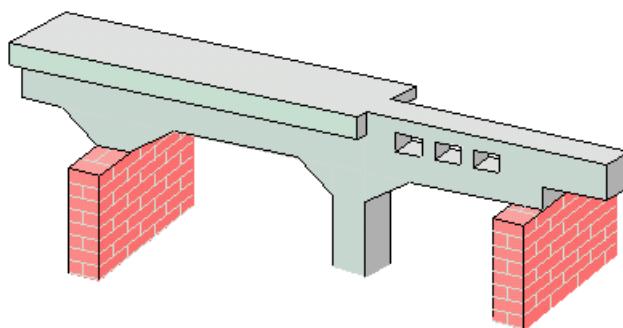
На графике и в таблице приведены расчетные значения прогибов, обусловленных деформациями изгиба и сдвига. Кроме того, в таблице приведены расчетные значения моментов и кривизн.

### Литература

1. СНиП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции/Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 80 с.
2. **СП 52-101-03. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры / Госстрой России. – М., 2003.**
3. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия/Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1987. – 36 с.
4. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелых и легких бетонов без предварительного напряжения арматуры (к СНиП 2.03.01-84)/ЦНИИпромзданий Госстроя СССР, НИИЖБ Госстроя СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 192 с.
5. СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2003. – 139 с.
6. Изменение №1 СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции / Минстройархитектуры Республики Беларусь. – Минск: 2004. – 22 с.



## 304 - Железобетонная балка (Еврокод 2)



Программа предназначена для проектирования и расчёта многопролетной балки согласно требованиям ТКП EN 1992-1-1: Еврокод 2 [1]. Возможно задание шарниров, вутов, консолей. Предусмотрен расчёт балки прямоугольного и таврового сечений. Могут задаваться распределённые и сосредоточенные нагрузки, а также температурные воздействия и осадки опор. Расчётные сочетания усилий определяются автоматически согласно СТБ EN 1990-2007 [2]. Возможен расчёт с перераспределением усилий. Продольная и поперечная арматура определяются на основе расчетов по предельным состояниям первой и второй групп. При конструировании продольной арматуры подбираются диаметры продольных стержней и определяются места их обрыва с учётом длин анкеровки. При конструировании поперечной арматуры определяется расположение хомутов и стержней поперечной арматуры, препятствующей срезу между стенкой и полками тавровых сечений.

## 1. Расчётная схема

Расчётная схема представляет собой многопролетную неразрезную балку с консолями. Максимальное количество пролётов равно 10. Сечение балки может быть прямоугольным или тавровым. Возможно наличие вутов и/или скачков размеров сечения по ширине и по высоте. Для концевых опор можно задавать упругое защемление. В опорах снизу и/или сверху могут учитываться примыкающие стойки, предусмотрен ввод вертикальных пружин в опорах. В пролётах можно задавать шарниры.

Для тавровых сечений рассчитывается эффективная ширина полки согласно пункту 5.3.2.1 [1]. Модуль упругости принимается согласно таблице 3.1 [1].

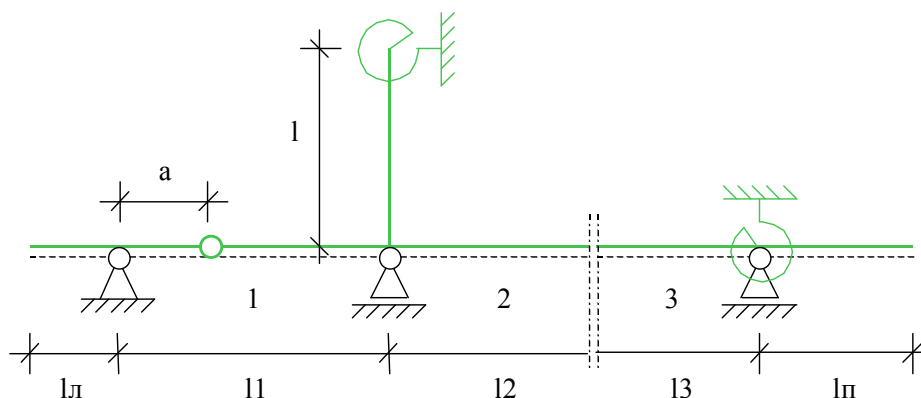


Рис. 1. Пример расчётной схемы

## 2. Нагружение

Различаются постоянные, переменные и особые воздействия. В последнем случае предусмотрено дополнительное подразделение на сейсмические и прочие особые воздействия. Возможен учет следующих нагрузок: равномерно распределенных, блочных, трапециевидных, нагрузок на перекрытие, сосредоточенных сил, сосредоточенных моментов, скачка температуры и смещения опор. Длительные и кратковременные нагрузки могут объединяться в группу несочетаемых нагрузок (нагрузки не могут действовать одновременно). Временная нагрузка может задаваться как знакопеременная нагрузка. В этом случае, в расчёте учитывается заданная нагрузка и нагрузка противоположного знака. Для временных нагрузок, действующих на нескольких пролетах, возможен учет неблагоприятного распределения нагрузки по пролетам.

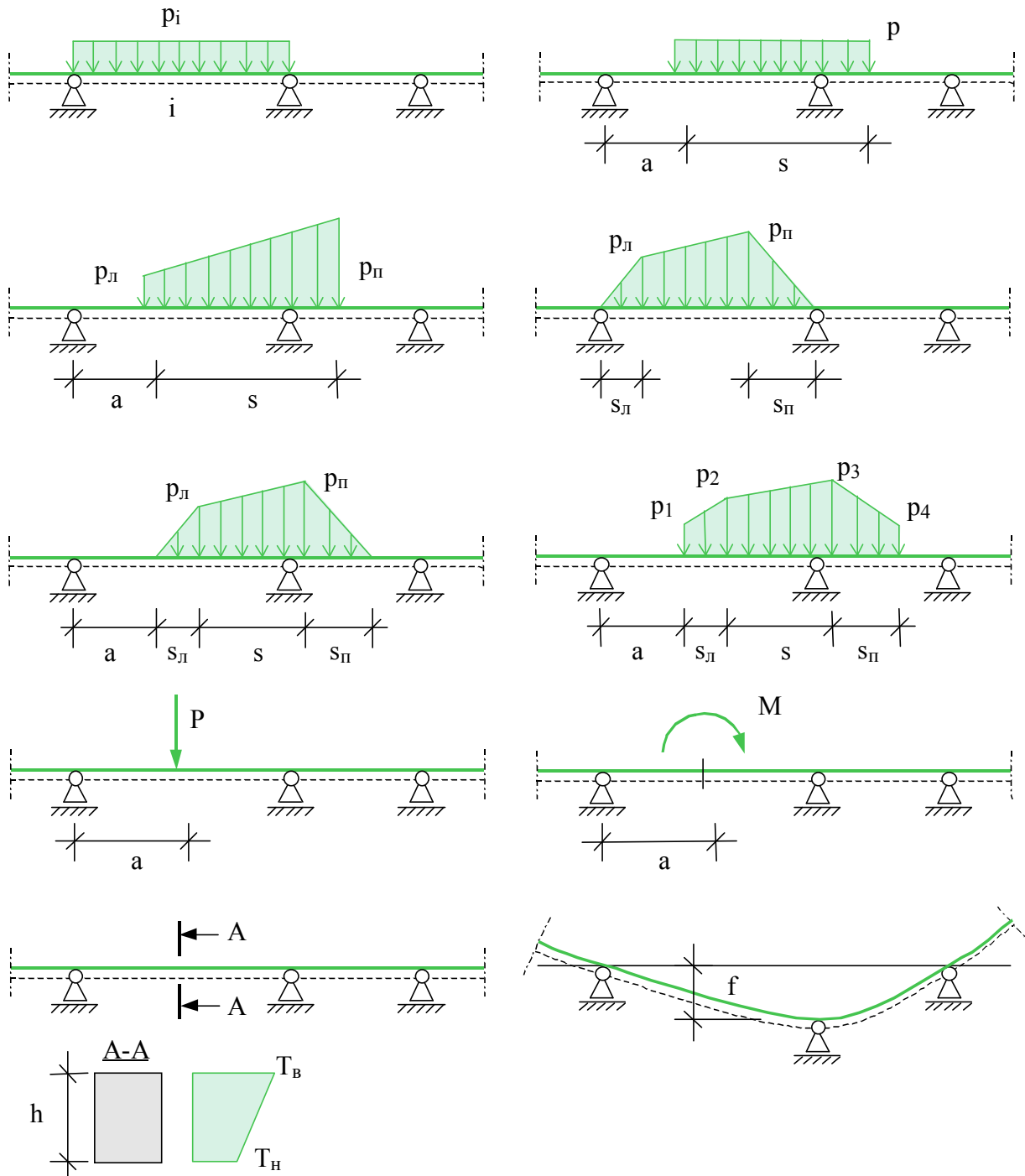


Рис. 2. Виды нагрузок

### 3. Определение внутренних силовых факторов

Усилия определяются методом начальных параметров отдельно для каждой нагрузки. Для временных нагрузок определяются максимальные и минимальные усилия в каждом сечении и опорные реакции с учётом неблагоприятного распределения нагрузки по пролётам (если учёт необходим).

При обычном линейном расчёте неразрезных балок не учитывается перераспределение усилий вследствие неупругих деформаций бетона и арматуры и образования трещин. Программа позволяет производить перераспределение усилий во внутренних опорах неразрезных балок

согласно методу предельного равновесия. При этом учитываются ограничения на коэффициент перераспределения согласно п. 5.5 [1]. Перераспределение происходит путём добавления треугольных эпюр моментов с привлечением двух соседних с опорой пролётов.

#### **4. Расчет требуемой арматуры**

Расчет требуемой продольной арматуры проводится на основе параболической диаграммы деформирования сжатого бетона. Арматурная сталь может быть выбрана различная для верхней, нижней и поперечной арматуры. Как для стали, так и для бетона предусмотрена возможность расчета с использованием нестандартных материалов, в этом случае пользователь задает прочностные характеристики материалов самостоятельно. В наиболее нагруженных сечениях производится конструирование арматуры, проверка на ширину раскрытия трещин и, при необходимости, запускается итерационный процесс увеличения требуемой арматуры для обеспечения выполнения этой проверки. Кроме того, учитываются требования по минимальным площадям продольной арматуры, согласно п.п. 7.2.3 и 9.2.1.1 [1]. Поперечная арматура в прямоугольном сечении и стенке таврового сечения рассчитывается согласно п. 6.2.3 [1] с учетом требований по минимальной арматуре п. 9.2.2 [1]. Для балок с тавровыми сечениями дополнительно производится расчет поперечной арматуры, препятствующей срезу между стенкой и полками согласно п. 6.2.4 [1].

#### **5. Конструирование продольной арматуры**

Программа поддерживает три различные формы конструирования арматуры:

- подбор арматуры без ступенчатой раскладки. В этом случае для каждого пролета и для каждой опоры проводится подбор арматуры в соответствии с максимально требуемой площадью арматуры;
- подбор арматуры с поперечной ступенчатой раскладкой. Длины арматурных стержней и их расположение в пролете и над опорой подбираются таким образом, чтобы площадь арматуры во всех сечениях была как можно ближе к требуемой по расчету. При определении длин продольных стержней учитывается длина анкеровки. Ступенчатая раскладка арматуры над опорами или в пролетах происходит независимо. Если в результате расчета на опорах требуется арматура сжатия, то вместо подбора арматуры с поперечной ступенчатой раскладкой следует использовать подбор арматуры со сквозной ступенчатой раскладкой, так как в этом случае нижняя арматура переходит границы пролетов;
- подбор арматуры со сквозной ступенчатой раскладкой. Аналогичен предыдущему с той лишь разницей, что границы пролетов не являются точками обрыва арматурных стержней.

В местах обрыва стержней и приопорных зонах длина арматурных стержней увеличивается на величину, обеспечивающую прочность наклонных сечений согласно п. 9.2.1.3 [1].

При подборе продольных стержней учитываются все стандартные диаметры (6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 32, 36, 40). Предусмотрена возможность задать собственный список диаметров. Для каждого пролета можно задать отдельно для верхней и нижней арматуры максимальное количество стержней, минимальный и максимальный диаметры. При подборе арматуры учитываются требования [1] по минимальным расстояниям между стержнями.

#### **6. Конструирование поперечной арматуры**

По заданным диаметрам хомутов, максимальным и минимальным расстояниям между ними подбирается расположение и шаг хомутов.

## 7. Расчеты по предельным состояниям по эксплуатационной пригодности

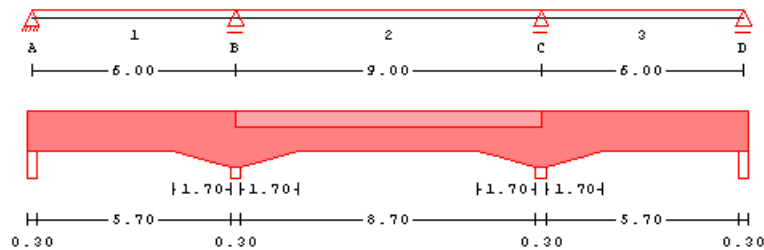
Программа выполняет расчеты по раскрытию трещин, а также расчет прогибов. При конструировании продольной арматуры происходит наращивание количества и длин стержней, пока предъявленные требования не будут удовлетворены во всех сечениях балки, за исключением участков непосредственно над опорами, которые не принимаются в расчет.

Если задано перераспределение усилий, то над опорами устанавливается уменьшенное количество арматуры, поэтому в этом случае требования по ограничению ширины раскрытия трещин в приопорных зонах часто не могут быть выполнены. Расчет прогибов проводится согласно п. 7.4.3 [1].

## 8. Вывод результатов

Вывод состоит из следующих частей: расчетная схема, нагрузки, результаты расчета внутренних силовых факторов, расчетные сочетания усилий, результаты расчета требуемой арматуры и конструирование арматуры. Вывод любой из этих шести частей можно разрешать или отменять флажками управления выводом. Помимо вывода числовых значений, предусмотрен и вывод графики.

Расчетная схема:



Размеры

Пролёт	l	x	b <sub>f</sub>	h <sub>f</sub>	b	h	I
	[м]	[м]	[см]	[см]	[см]	[см]	[см <sup>4</sup> ]
1	6.00	0.00			24.0	50.0	250000
		4.15			24.0	50.0	250000
		6.00			24.0	70.0	686000
2	9.00	0.00	224.0	20.0	24.0	70.0	1558770
		1.85	224.0	20.0	24.0	50.0	591026
		7.15	224.0	20.0	24.0	50.0	591026
3	6.00	0.00	224.0	20.0	24.0	70.0	1558770
		1.85			24.0	50.0	250000
		6.00			24.0	50.0	250000

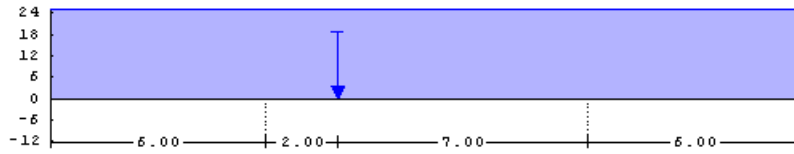
Опоры

Опора	t [см]	Опора	t [см]
A	30.0	B	30.0
C	30.0	D	30.0

Здесь выводятся основные геометрические параметры системы: размеры всех пролетов и стоек, характеристики сечений всех пролетов, т.е. ширина “b” и высота “h” сечения, ширина “b<sub>f</sub>” и толщина “h<sub>f</sub>” плиты, ширина опор “t”.

## Нагрузки:

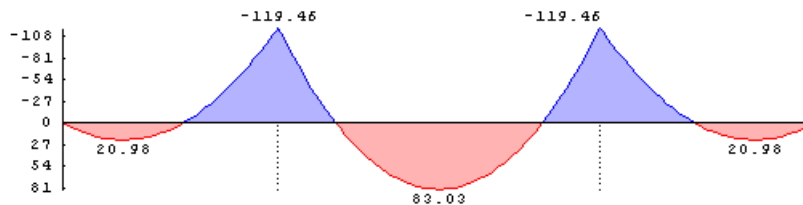
Нагружение 2 постоянные нагрузки



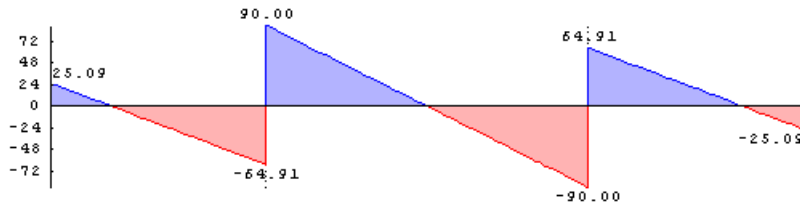
	N.	Пролёт	a	z	рл/Р	рп/М
			[м]	[м]	[кН/м, кН, кНм]	
Равномерн.	1	1-3			25.00	
Сосредот.	1	2	2.00		125.00	

## Внутренние силовые факторы:

Нагружение 1 моменты Мупр [кНм]



Нагружение 1 поперечные силы Qупр [кН]



Нагружение 1

Пролёт	x	max Мупр	min Мупр	max Qупр	min Qупр
	[м]	[кНм]	[кНм]	[кН]	[кН]
1	0.00	0.00	0.00	25.09	25.09
	0.15 o	3.59	3.59	22.84	22.84
	0.62 ho	12.59	12.59	15.80	15.80
	1.67 *	20.98	20.98	0.00	0.00
	5.18 ho	-71.35	-71.35	-52.63	-52.63
	5.85 o	-109.90	-109.90	-62.66	-62.66
	6.00	-119.47	-119.47	-64.91	-64.91
2	0.00	-119.47	-119.47	90.00	90.00
	0.15 o	-106.19	-106.19	87.00	87.00

Для каждого нагружения выводятся характеристические максимальные и минимальные усилия в сечении Мупр и Qупр. Различие между максимальными и минимальными значениями возникает только для длительных и кратковременных нагрузок и связано с благоприятным и неблагоприятным распределением этих нагрузок по пролетам. Результаты выводятся на границах пролетов, на срезе опор (точки помечены "o"), на расстоянии рабочей высоты сечения от среза опор (точки помечены "ho") и в точках с максимальными значениями внутренних силовых факторов (точки помечены "\*"). Объем вывода может быть увеличен пользователем путем задания дополнительных точек.

Вывод расчетных сочетаний усилий аналогичен выводу результатов упругого расчета внутренних силовых факторов. При задании перераспределения опорных моментов выводятся РСУ как до перераспределения, так и после.

### Результаты расчета требуемой арматуры:

Расчёт по прочности Согласно ТКП EN 1992-1-1: Проект. ж/б конструкций  
Бетон С30/37, сталь (верх/низ/хом.) S500/S500/S400

Защитный слой	Пролёт	$a_{з, н}$	$a_{з, в}$	$a_{з, б}$	$a_n$	$a_s$
		[мм]	[мм]	[мм]	[см]	[см]
	1	38	38	30	4.6	4.5
	2	38	38	30	4.6	4.5

Пролёт 1	x [м]	max M	min M	$A_{сн} (I)$	$A_{св} (I)$	$A_{сн}$	$A_{св}$
		[кНм]	[кНм]	[см <sup>2</sup> ]	[см <sup>2</sup> ]	[см <sup>2</sup> ]	[см <sup>2</sup> ]
	0.00	0.0	0.0	2.51	0.00	2.51	0.00
	0.15 о	39.1	27.1	2.51	0.00	2.51	0.00
	1.00	203.4	138.3	8.25	0.00	8.25	0.00
	2.00	272.0	176.9	11.09	0.00	11.09	0.00
	2.01 *	272.0	176.8	11.09	0.00	11.09	0.00
	3.00	205.5	115.3	8.34	0.00	8.34	0.00
	4.00	4.0	-46.3	2.51	4.85	2.51	4.85
	4.85 о	-262.2	-273.3	0.00	11.79	0.00	11.79
	5.00	-307.8	-332.4	0.00	14.63	0.00	14.63

x [м]	$V_{ед}$	$V_{здс}$	$V_{зds}$	$V_{здmax}$	$A_{св}/s$
	[кН]	[кН]	[кН]	[кН]	[см <sup>2</sup> /м]
0.00					
0.15 о	250.8	64.5	250.8	592.2	3.96
0.65 h0	182.7	70.6	182.7	580.1	3.96
1.00	136.0	78.6	136.0	575.9	3.29
2.00	12.8	86.7			3.29
3.00	134.0	78.8	134.0	575.7	3.29
4.00	269.0	65.9	269.0	561.4	6.02
4.29 h0	308.8	64.6	308.8	580.1	6.69
4.85 о	383.7	64.6	383.7	541.3	6.66
5.00					

Выводятся толщины защитных слоев “аз” снизу, сверху и сбоку и расстояния до центров тяжести арматурных слоев. В таблице расчета продольной арматуры выводятся значения максимальных моментов и расчетные значения площади арматуры, полученные из расчета по несущей способности (I), и окончательные, с учетом требований по ширине раскрытия трещин и минимальной арматуры.

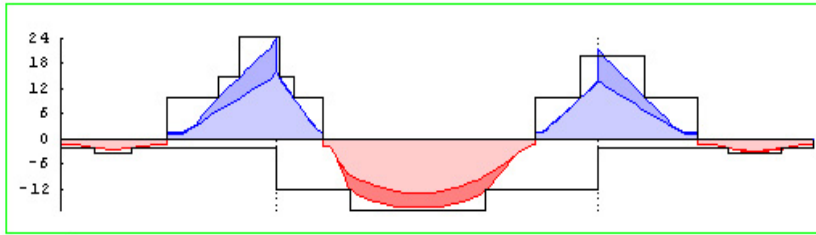
Конструирование арматуры:

Констр. арматуры

$A_s$  [см<sup>2</sup>]

M = 1 : 170

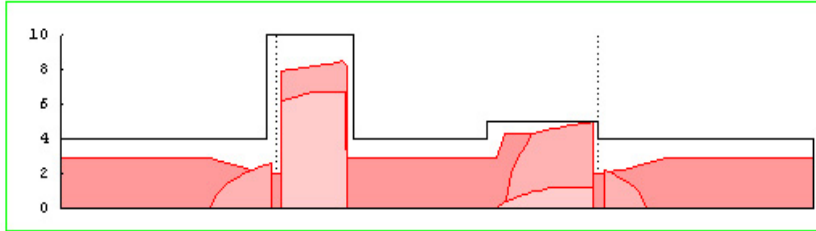
Продольная арматура



$A_{sw}/s$  [см<sup>2</sup>/м]

M = 1 : 170

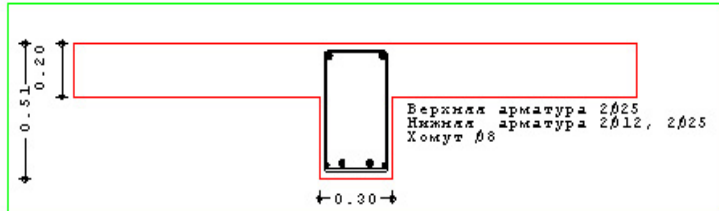
Поперечная арматура



Пролет 2

M = 1 : 25

схема армирования сечения с координатой x = 7.23



Монтажная арматура нижняя n = 2 d<sub>с</sub> = 12 мм

Продольн. арм.

пролёт	тип	кол.	d <sub>с</sub>	ряд	A <sub>s1</sub>	a	l
опора			[мм]		[см <sup>2</sup> ]	[м]	[м]
1	н	2	12	1	2.26	0.00	21.00
1	н	1	12	1	3.39	0.63	1.65
1	н	4	12	1	7.92	-0.33	6.53
2	н	2	25	1	12.08	-0.37	9.75
2	н	1	25	1	16.99	1.33	5.29
3	н	1	12	1	3.39	3.28	2.18
В	в	2	25	1	9.82	-3.40	5.10
В	в	1	25	1	14.73	-2.32	3.52
В	в	2	25	1	24.54	-1.65	2.70
С	в	2	25	1	9.82	-2.14	5.26
С	в	2	25	1	19.63	-1.17	3.01

Длины приведены с учетом анкеровки

Хомуты

Пролёт	кол.	срез.	d <sub>с</sub>	s	A <sub>sw</sub> /s	a	l
			[мм]	[см]	[см <sup>2</sup> /м]	[м]	[м]
1	24	2	8	25	4.02	0.00	5.75
2	24	2	8	10	10.05	-0.25	2.40
2	15	2	8	25	4.02	2.15	3.75
2	15	2	8	20	5.03	5.90	3.00
3	25	2	8	25	4.02	-0.10	6.10

Тип арматуры	d	длина	кол.	вес
	[мм]	м		[кН]
стержневая арматура	25	60.45		2.29
стержневая арматура	12	29.93		0.26
хомуты	8		104	



Поперечная арматура препятствующая срезу между полкой и стенкой

$V_{рас} = 0.53 \text{ МПа}, V_{расмакс} = 5.28 \text{ МПа}, d = 10 \text{ мм}$						
Пролет	x [м]	$V_{ед}$ [МПа]	$A_{св}/S$ [см <sup>2</sup> /м]	S [см]	n	$A_{св}/S$ [см <sup>2</sup> /м]
1	0.00	0.90	5.17	30	5x2	5.24
	3.49	0.79	4.55	20	1x2	7.85
	3.69	0.95	5.47	10	2x2	15.71
	3.89	2.63	15.15	5	4x2	31.42
	4.09	2.44	14.02	10	1x2	15.71
	4.19	2.16	12.41	5	37x2	31.42
2	1.04	2.72	15.64	10	2x2	15.71
	1.24	0.90	5.19	30	5x2	5.24
	4.75	0.79	4.56	25	1x2	6.28

На графиках показаны распределения расчетных значений требуемой арматуры и результаты конструирования. Основная (более светлая) часть эпюры требуемой арматуры соответствует расчету по предельным состояниям несущей способности, а более темные добавки – результат расчета по эксплуатационной пригодности. Схемы армирования сечений выводятся для наиболее нагруженных сечений в пролетах и над опорами, а также в точках, заданных пользователем. В таблице продольной арматуры приведено количество, диаметры, длины и положение арматурных стержней. В таблице поперечной арматуры приведены диаметр и шаг хомутов, а также начальная координата и протяженность участков с постоянным шагом хомутов. Также приводится сводная таблица расхода арматуры.

#### Расчет ширины раскрытия трещин:

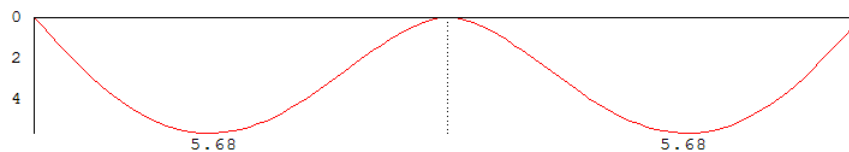
Трещиностойкость допустимая ширина раскрытия трещин  $w_{lim} = 0.20 \text{ мм}$

Нормальные трещины	Пролет	x [м]	M [кНм]	$M_{рас}$ [кНм]	$\sigma_s$ [МПа]	$A_{с,эфф}$ [см <sup>2</sup> ]	$w_k$ [мм]	
1	0.00		0.0	74.6				
	0.15	o	27.1	74.6				
	1.00		138.3	74.6	323.2	345.00	0.17	
	2.00		176.9	77.2	277.8	345.00	0.15	
	2.01	*	176.8	77.2	277.7	345.00	0.15	
	3.00		115.3	74.6	269.2	345.00	0.14	
	4.00		-46.3	145.7				
	4.85	o	-262.2	109.3	386.4	580.00	0.21	
	5.00		-307.8	109.3	454.5	580.00	0.26	
	2	0.00		-307.8	109.3	454.5	580.00	0.26
		0.15	o	-262.2	109.3	386.4	580.00	0.21
1.00			-46.3	145.7				
2.00			115.3	74.6	269.2	345.00	0.14	
2.99		*	176.8	77.2	277.7	345.00	0.15	
3.00			176.9	77.2	277.8	345.00	0.15	
4.00			138.3	74.6	323.2	345.00	0.17	
4.85		o	27.1	74.6				
5.00			0.0	74.6				

В таблицах приведены значения моментов, вычисленные для почти постоянных РСУ, моментов начала образования трещин и расчетная ширина их раскрытия в тех сечениях, где действующие усилия превосходят значения начала трещинообразования.

## Расчет прогибов:

Прогибы [мм]  
 $M = 1 : 80$



Прогибы

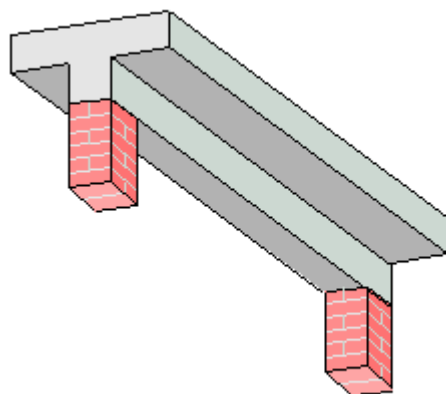
Пролет	x [м]	M [кНм]	$100/\rho_I$ [1/м]	$100/\rho_{II}$ [1/м]	$100/\rho$ [1/м]	w [мм]
1	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.00	138.4	0.14	0.33	0.30	3.98
	2.00	176.9	0.18	0.29	0.28	5.67
	2.17 *	173.6	0.18	0.29	0.28	5.68
	3.00	115.3	0.12	0.28	0.24	4.68
	4.00	-46.2	-0.05	0.00	-0.05	1.92
	5.00	-307.8	-0.38	-0.58	-0.56	0.00
2	0.00	-307.8	-0.38	-0.58	-0.56	0.00
	1.00	-46.2	-0.05	0.00	-0.05	1.92
	2.00	115.3	0.12	0.28	0.24	4.68
	2.83 *	173.6	0.18	0.29	0.28	5.68
	3.00	176.9	0.18	0.29	0.28	5.67
	4.00	138.4	0.14	0.33	0.30	3.98
	5.00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00

На графике и в таблице приведены расчетные значения прогибов. Кроме того, в таблице приведены расчетные значения моментов и кривизн нетреснувших сечений (I), полностью треснувших сечений (II) и результирующих значений.

## Литература

1. ТКП EN 1992-1-1: Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций – Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий.
2. СТБ EN 1990-2007: Еврокод. Основы проектирования несущих конструкций.

## 313 – Расчет ж/б балки по огнестойкости



Программа предназначена для расчёта по огнестойкости однопролетной железобетонной балки согласно СТО НИИЖБ [1]. 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. Возможен нелинейный расчет прогиба на основе диаграмм деформирования сжатого бетона и арматурной стали.

## 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).

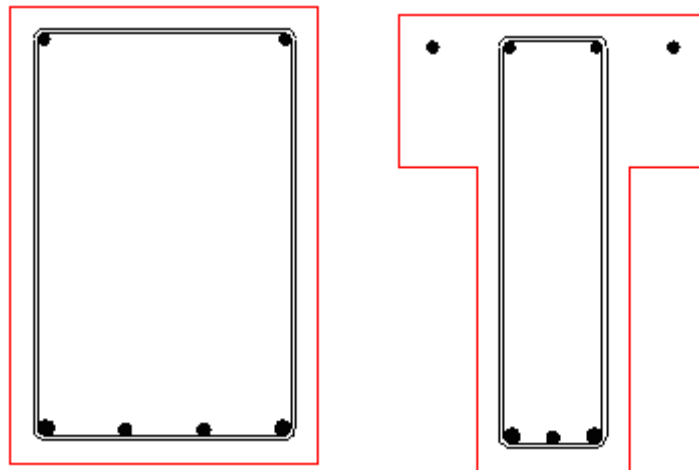


Рис.1. Виды сечений

Продольная арматура располагается у верхней и нижней граней 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. При вводе одиночного стержня задаются координаты центра стержня. Для удобства ввода в качестве осей координат принимаются оси, направленные по нижней и левой сторонам прямоугольного сечения или по левой стороне полки и нижней 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 в нормальном сечении 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

Расчет по огнестойкости проводится для наиболее неблагоприятного сочетания нормативных постоянных и длительных нагрузок согласно СНиП 2.01.07-85\* «Нагрузки и воздействия».

В том случае, когда нельзя установить значение нормативной нагрузки, следует принимать ее согласно [1] равной 0,7 от расчетной нагрузки.

Возможно задание равномерно распределенной нагрузки по всей длине балки, а также задание сосредоточенной поперечной силы  $Q$  и/или сосредоточенного момента  $M$ . Точка приложения сосредоточенной нагрузки определяется по расстоянию  $x$  от левого края балки. Положительные направления нагрузок показаны на рис.2.

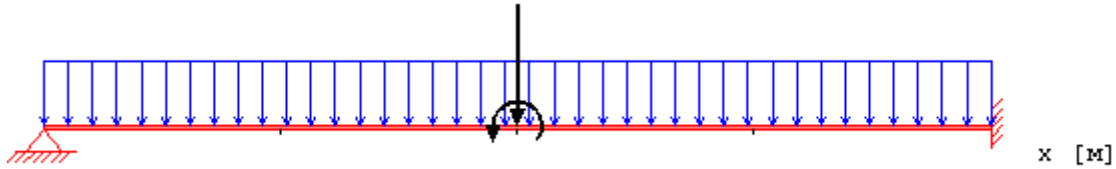


Рис. 2. Положительные направления нагрузок

### 3. Определение температурного поля

Для определения предела огнестойкости необходимо рассчитать температурное поле в сечении балки 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  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности,  $c$  - удельная теплоемкость,  $\rho$  - плотность материала,  $y, z$  - координаты в плоскости сечения. При расчете температуры в сечении балки не учитывается влияние арматуры.

Огневое воздействие характеризуется зависимостью температуры среды от времени, отсчитываемого от начала пожара. Согласно ГОСТ 30247.0-94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования» 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.3.

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  $\Delta t$  - шаг по времени. Расчет

температурного поля в сечении производится для дискретных моментов времени. Производные по координатам также заменяются разностными отношениями. После определения температуры на конечноразностной сетке, температура в произвольной точке сечения определяется интерполяцией.

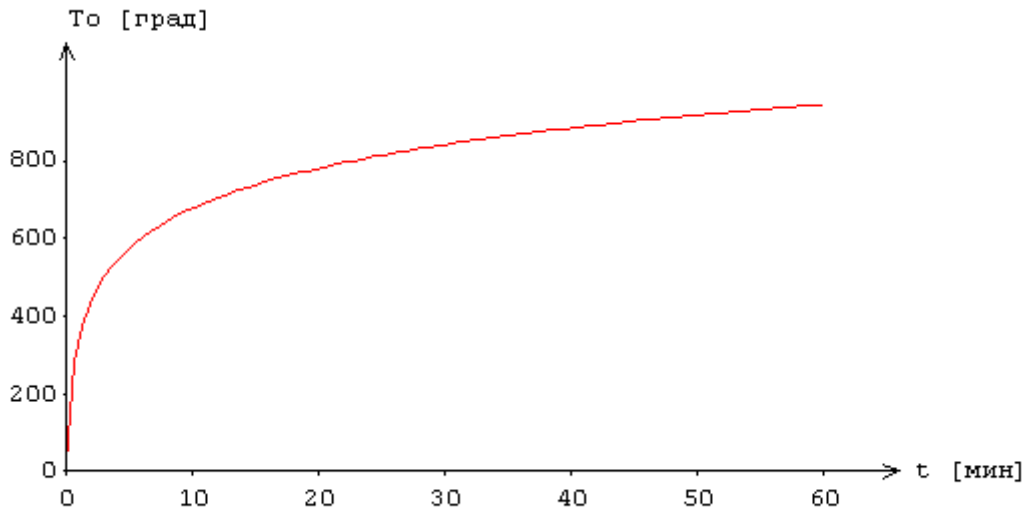


Рис.3. Зависимость температуры среды от времени

При решении температурной задачи рассматривается нагрев всех сторон сечения, кроме верхней. Предусмотрен вывод распределения температуры вдоль вертикальной оси сечения и картины изотерм (рис.4).

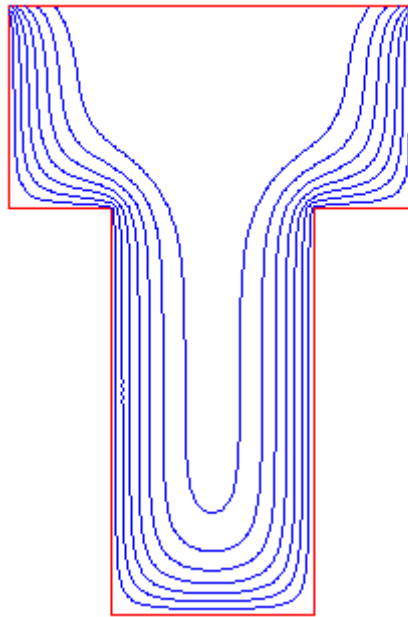


Рис.4. Пример картины изотерм

#### 4. Расчет балки

Расчет балки по огнестойкости включает проверку прочности при действии изгибающего момента и проверку прочности при действии поперечной силы. Огнестойкость балки характеризуется периодом времени от начала пожара до момента потери несущей способности.

#### 4.1 Проверка прочности при действии изгибающего момента

Усилия в балке определяются при помощи линейного расчета. Производится выбор изгибающих моментов, для которых проводится расчет по огнестойкости. В качестве расчетных моментов принимаются наибольшие по абсолютному значению положительный и отрицательный моменты  $M_{\min}, M_{\max}$ .

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. Нормативные сопротивления сжатого бетона и арматуры при нормальной температуре принимаются согласно [2]. Предусмотрена возможность задания материалов с ненормированной прочностью.

Для каждого расчетного изгибающего момента в текущий момент времени определяется коэффициент запаса прочности  $\gamma_u$  и строится зависимость наименьшего значения  $\gamma_u$  от времени. Предел огнестойкости определяется по моменту времени, при котором  $\gamma_u = 1$  (рис.5).

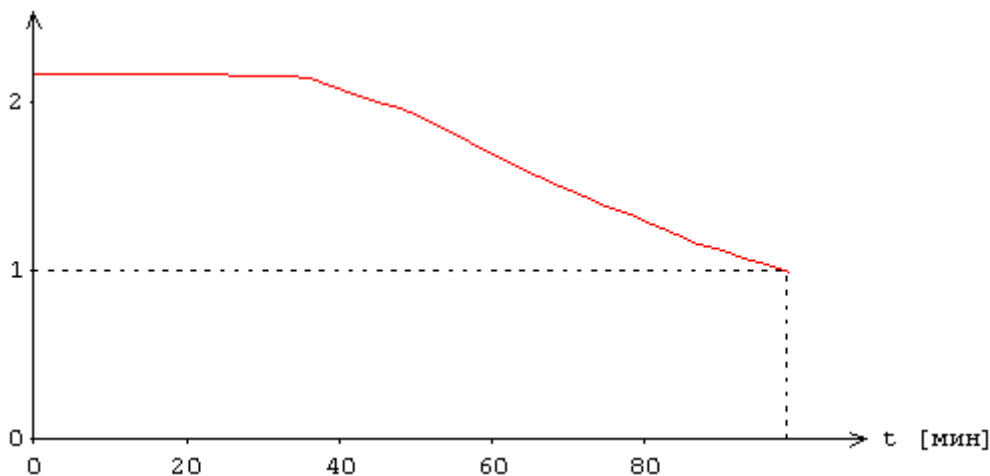


Рис.5. Пример изменения коэффициента запаса прочности во времени

#### 4.2 Проверка прочности при действии поперечной силы

Расчет проводится, если обеспечена несущая способность балки при действии изгибающего момента. Проверки прочности при действии поперечной силы проводятся согласно [1], 8.28-8.33 для момента времени, соответствующего требуемому пределу огнестойкости. Расчет при огневом воздействии аналогичен расчету при нормальной температуре по [2], 6.2.32 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  $500^{\circ}\text{C}$  для бетона с силикатным заполнителем и  $600^{\circ}\text{C}$  для бетона с карбонатным заполнителем. В качестве расчетных сопротивлений бетона  $R_b, R_{bt}$  принимаются нормативные значения  $R_{bn}, R_{bnt}$  при нормальной температуре согласно [2]. Расчетное сопротивление поперечной арматуры  $R_{swt}$  принимается равным сопротивлению стали при наибольшей температуре хомутов. Предусмотрена возможность задания материалов с ненормированной прочностью.



Условие прочности по наклонному сечению (8.57) [1] представляется в виде  $Q/(Q_b + Q_{sw}) \leq 1$ . В соответствии с [1], 8.32, 8.33 значение  $Q_{sw}$  не учитывается при расчете, если не выполняется условие (8.61) или условие (8.62).

При выполнении условия прочности, текстовый вывод производится для того наклонного сечения, для которого левая часть условия прочности принимает наибольшее значение. Пример графического вывода приведен на рис.6.

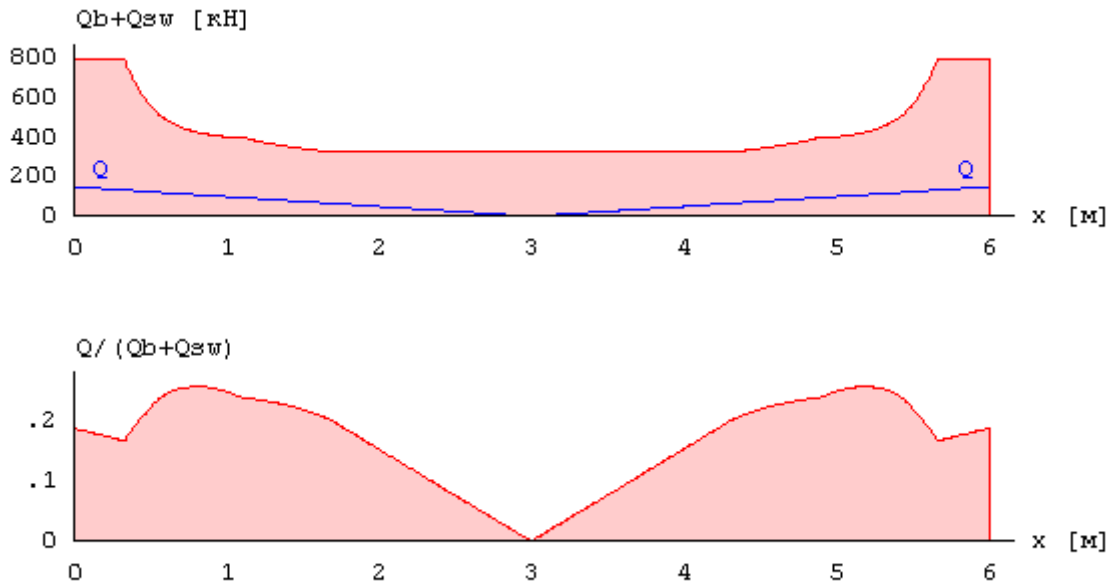


Рис.6. Пример графического вывода

## 5. Нелинейный расчет прогиба

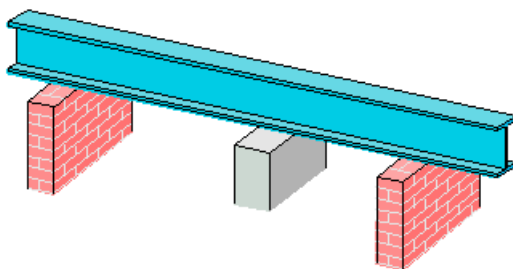
Расчет проводится, если обеспечена несущая способность балки при действии изгибающего момента и поперечной силы. Прогиб балки определяется для момента времени, соответствующего требуемому пределу огнестойкости. В нелинейном расчете кривизна  $\kappa$  определяется на основе диаграмм деформирования сжатого бетона и арматурной стали при огневом воздействии. Из-за нелинейного характера зависимости  $\kappa(M)$  система уравнений поперечного изгиба является нелинейной. Производная кривизны по  $M$  может рассматриваться как величина, обратная к локальной изгибной жесткости  $D$ . 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  $\varepsilon$  [%].

При нелинейном расчете производится разбиение балки на участки, в пределах которых изгибная жесткость  $D$  принимается постоянной. При вводе задается номинальный шаг дискретизации балки. Предусмотрен вывод расчетных значений изгибной жесткости  $D$  и значений отношения  $D/D_0$  ( $D_0$  - изгибная жесткость приведенного сечения балки в линейной постановке при нормальной температуре). Следует отметить, что  $D$  существенно меньше  $D_0$ .

### Литература

1. СТО 36554501-006-2006: Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций / ФГУП «НИЦ «Строительство». – М.: ФГУП ЦПП, 2006.
2. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры / ГУП «НИИЖБ», ФГУП ЦПП. – М., 2004.

## 320 – Стальная балка



Программа предназначена для расчёта многопролетной стальной балки согласно СНиП II-23-81\* “Стальные конструкции” [1], либо по СП 53-102-2004 “Общие правила проектирования стальных конструкций” [2], либо СП 16.13330.2011 “Стальные конструкции” [5]. Возможно задание шарниров, консолей, примыкающих стоек и упругих опор. Могут задаваться распределённые и сосредоточенные нагрузки, а также температурные воздействия и осадки опор. Расчётные сочетания усилий определяются автоматически согласно СНиП 2.01.07-85 “Нагрузки и воздействия” [3], либо по СП 20.13330.2011 “Нагрузки и воздействия” [6]. Реализованы прокатные и несимметричные сварные сечения из швеллеров, двутавра и короба с возможным заданием дополнительных поясных листов. Расчет производится по упругой или упруго-пластической схеме с перераспределением усилий. Проводятся расчеты прочности, устойчивости плоской формы изгиба балки, устойчивости стенки с установкой, при необходимости, ребер жесткости. Для балки из прокатного профиля реализован режим подбора минимально номера профиля, удовлетворяющего условиям прочности. Для сварного двутавра возможен подбор размеров сечения с устойчивой или с гибкой стенкой.

## 1. Расчётная схема

Расчётная схема представляет собой многопролетную неразрезную балку с консолями. Максимальное количество пролётов равно 10. Для концевых опор можно задавать упругое защемление. В опорах снизу и/или сверху могут учитываться примыкающие стойки, предусмотрен ввод вертикальных пружин в опорах. В пролётах можно задавать шарниры.

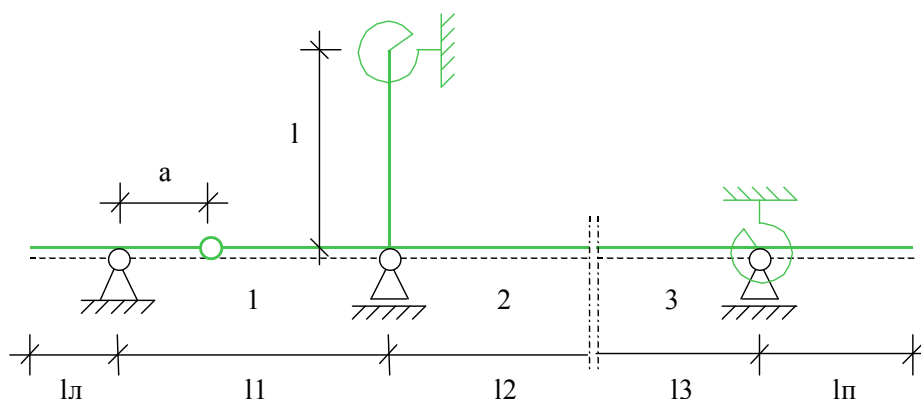


Рис. 1. Пример расчётной схемы

## 2. Нагружение

Различаются постоянные, длительные, кратковременные и особые нагрузки. Возможен учет следующих нагрузок: равномерно распределенных, блочных, трапециевидных, нагрузок на перекрытие, сосредоточенных сил, сосредоточенных моментов, скачка температуры и смещения опор. Длительные и кратковременные нагрузки могут объединяться в группу несочетаемых нагрузок (нагрузки не могут действовать одновременно). Временная нагрузка может задаваться как знакопеременная нагрузка. В этом случае, в расчёте учитывается заданная нагрузка и нагрузка противоположного знака. Для временных нагрузок, действующих на нескольких пролетах, возможен учет неблагоприятного распределения нагрузки по пролетам. При расчете по СП 16.13330.2011, если есть необходимость учесть бимомент, возникающий при стесненном кручении балки, дополнительно задается положение нагрузки относительно центра тяжести профиля.

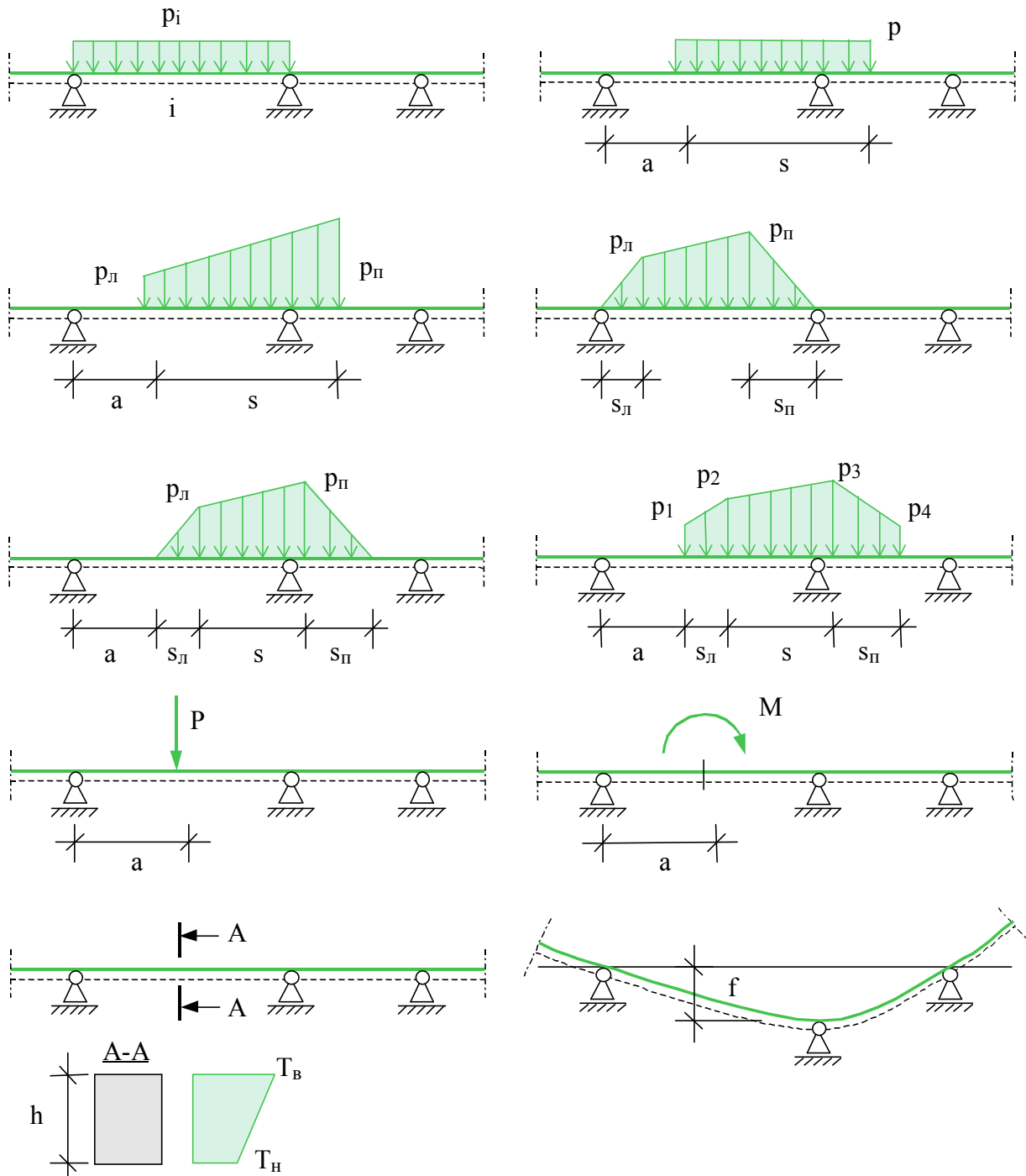


Рис. 2. Виды нагрузок

### 3. Определение внутренних силовых факторов

Усилия определяются методом начальных параметров отдельно для каждой нагрузки. При необходимости учета напряжений от стесненного кручения по СП 16.13330.2011, помимо задачи об изгибе балки, решается тем же методом задача о стесненном кручении. Для временных нагрузок определяются максимальные и минимальные усилия в каждом сечении и опорные реакции с учётом наиболее неблагоприятного распределения нагрузки по пролётам (если учет необходим). При расчете с учетом пластических деформаций учитывается

перераспределение опорных и пролетных моментов согласно п. 5.22 СНиП II-23-81\* или п. 9.2.5 СП 53-102-2004 или п. 8.2.5 СП 16.13330.2011. Далее, в соответствии с правилами СНиП 2.01.07-85 или 8.2.5 СП 20.13330.2011, строится таблица наиболее опасных сочетаний нагрузок, которая используется в дальнейших расчетах.

#### **4. Расчет на прочность**

Расчет на прочность по упругой схеме осуществляется в соответствии с пп. 5.12-5.14\* СНиП II-23-81\* или 9.2.1-9.2.2 СП 53-102-2004 или 8.2.1-8.2.2 СП 16.13330.2011. При учете пластических деформаций расчет на прочность производится согласно п. 5.18\* СНиП II-23-81\* или п. 9.2.3 СП 53-102-2004 или 8.2.3 СП 16.13330.2011.

#### **5. Расчет устойчивости плоской формы изгиба балки**

Расчет на устойчивость не производится при передаче нагрузки через сплошной жесткий настил, непрерывно опирающийся на сжатый пояс балки и надежно с ним связанный. Во всех остальных случаях производится проверка устойчивости плоской формы изгиба балки согласно п. 5.15 СНиП II-23-81\* или 9.4.1 СП 53-102-2004 или 8.4.1 СП 16.13330.2011. При этом коэффициент устойчивости при изгибе  $\phi_b$  определяется расчетным путем с учетом конкретных условий нагружения балки (PCY, PCN, положения нагрузки), конкретного профиля и условий закрепления от смещения в поперечном направлении. В частном случае двутаврового сечения и простейших типов нагружения результаты расчета совпадают с п. 2 Приложения 7\* СНиП II-23-81\* или пп. М.4-М.6 Приложения М СП 53-102-2004 или пп. Ж.4-Ж.6 Приложения Ж СП 16.13330.2011.

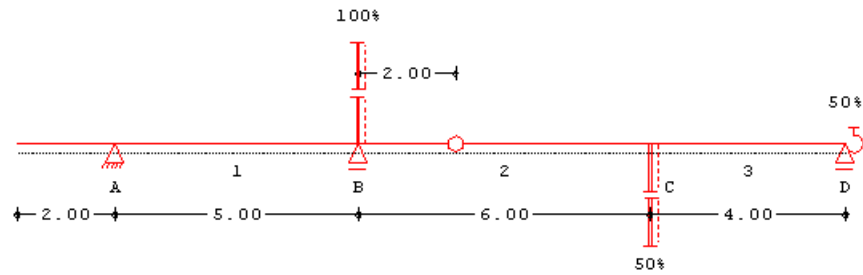
#### **6. Расчет устойчивости стенки балки**

Для балки из сварного профиля при условной гибкости стенки  $\bar{\lambda}_w > 3,2$  проводится расчет устойчивости стенки согласно пп. 7.2\*-7.6\*, 7.9 СНиП II-23-81\* или 9.5.2-9.5.8 СП 53-102-2004 или 8.5.2-8.5.8 СП 16.13330.2011. При выборе автоматической установки ребер жесткости, программа устанавливает их в соответствии с положениями п. 7.10 СНиП II-23-81\* или 9.5.9 СП 53-102-2004 или 8.5.9 СП 16.13330.2011, но так, чтобы выполнялись указанные выше условия устойчивости стенок в отсеках.

#### **7. Вывод результатов**

Вывод состоит из следующих частей: расчетная схема, нагрузки, результаты расчета внутренних силовых факторов, расчетные сочетания усилий, характеристики сечения, результаты расчета прочности, результаты расчета устойчивости балки и ее стенки. Вывод любой из этих восьми частей можно разрешать или отменять флажками управления выводом. Помимо вывода числовых значений, предусмотрен и вывод графики.

Расчетная схема:



Опоры

Опора	t [см]	Опора	t [см]
A	30.0	B	30.0
C	30.0	D	30.0

Зачемление прав. = 50 %  $l_e = 4.00$  м

Стойки

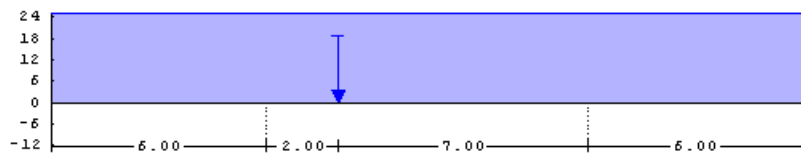
Опора	h [м]	E [%]	I [см <sup>4</sup> ]
B верх	3.00	100.0	10000
C низ	3.00	50.0	10000

Здесь выводятся основные геометрические параметры системы: размеры всех пролетов и стоек, ширина опор "t", расположение шарниров, защемление крайних опор.

Нагрузки:

Напряжение 2

постоянные нагрузки

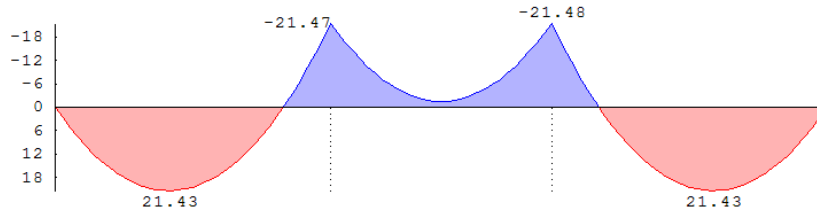


N.	Пролёт	a [м]	z [м]	рл/Р [кН/м, кН, кНм]	рп/М
Равномерн.	1	1-3		25.00	
Сосредот.	1	2	2.00	125.00	

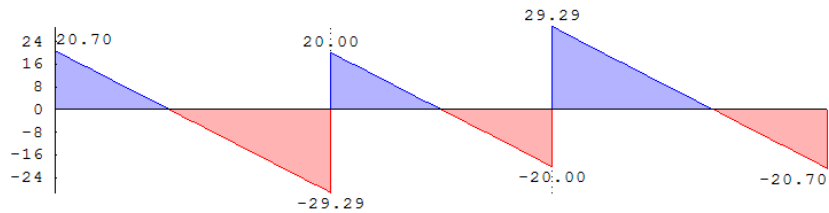
### Внутренние силовые факторы:

Усилия в сечении по линейно упругой теории

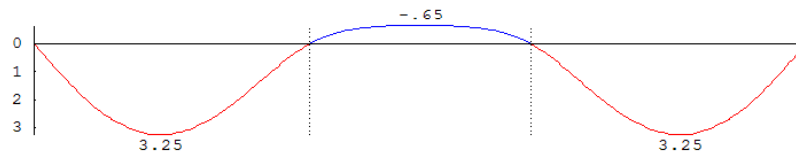
Нагружение 1 моменты  $M_{y,пр}$  [кНМ]  
 $M = 1 : 115$



Нагружение 1 поперечные силы  $Q_{y,пр}$  [кН]  
 $M = 1 : 115$



Нагружение 1 прогибы  $f_{y,пр}$  [мм]  
 $M = 1 : 115$



Пролет	x [м]	max			min		
		$M_1$ [кНМ]	$Q_1$ [кН]	$w_1$ [мм]	$M_1$ [кНМ]	$Q_1$ [кН]	$w_1$ [мм]
1	0.00	0.00	20.70	0.00	0.00	20.70	0.00
1	1.25	18.07	8.20	2.49	18.07	8.20	2.49
1	2.07*	21.43	0.00	3.22	21.43	0.00	3.22
1	2.29*	21.18	-2.15	3.25	21.18	-2.15	3.25
1	2.50	20.51	-4.30	3.22	20.51	-4.30	3.22
1	3.75	7.33	-16.80	1.93	7.33	-16.80	1.93
1	5.00	-21.48	-29.30	0.00	-21.48	-29.30	0.00
2	0.00	-21.48	20.00	0.00	-21.48	20.00	0.00
2	1.00	-6.50	10.00	-0.57	-6.50	10.00	-0.57
2	2.00*	-1.48	0.00	-0.65	-1.48	0.00	-0.65
2	3.00	-6.50	-10.00	-0.57	-6.50	-10.00	-0.57
2	4.00	-21.48	-20.00	0.00	-21.48	-20.00	0.00
3	0.00	-21.48	29.30	0.00	-21.48	29.30	0.00
3	1.25	7.33	16.80	1.93	7.33	16.80	1.93
3	2.50	20.51	4.30	3.22	20.51	4.30	3.22
3	2.71*	21.18	2.15	3.25	21.18	2.15	3.25
3	2.93*	21.43	0.00	3.22	21.43	0.00	3.22
3	3.75	18.07	-8.20	2.49	18.07	-8.20	2.49
3	5.00	0.00	-20.70	0.00	0.00	-20.70	0.00

Для каждого нагружения выводятся характеристические максимальные и минимальные усилия в сечении  $M_{упр}$  и  $Q_{упр}$ . Различие между максимальными и минимальными значениями возникает только для длительных и кратковременных нагрузок и связано с благоприятным и неблагоприятным распределением этих нагрузок по пролетам. Результаты выводятся на границах пролетов, в точках с максимальными значениями внутренних силовых факторов (точки помечены “\*”), а также в промежуточных точках, определенных пользователем.

Вывод расчетных сочетаний усилий аналогичен выводу результатов упругого расчета внутренних силовых факторов. Для балок 2-го класса (допускаются ограниченные пластические деформации) выводятся РСУ до и после перераспределения пролетных и опорных моментов.

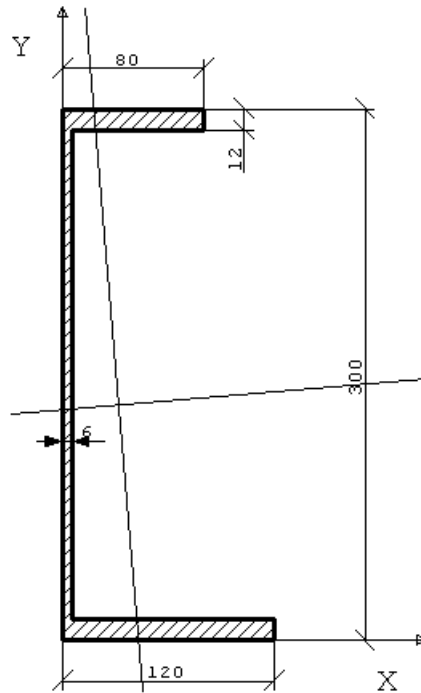


## Сечение балки и его характеристики:

## Сечение балки

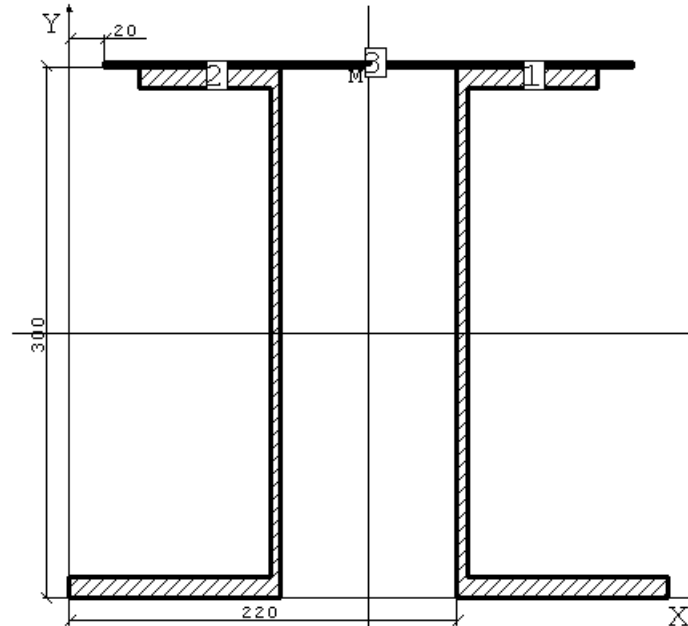
Профиль 300X80X12.0 швеллер сварной

М = 1 : 4



## Сечение балки

М = 1 : 4



Верхний пояс	высота $h = 300\text{мм}$	толщ.стенки $t_w = 6.0\text{мм}$
	шир.полки $b_1 = 80\text{мм}$	толщ.полки $t_1 = 12.0\text{мм}$
Нижний пояс	шир.плиты $b_{1p} = 300\text{мм}$	толщ.плиты $t_{1p} = 3.0\text{мм}$
	шир.полки $b_2 = 120\text{мм}$	толщ.полки $t_2 = 12.0\text{мм}$
Параметры сечения	расстояние между швеллерами $d = 100.0\text{мм}$	
	площадь $A = 90.1\text{см}^2$	мом.инерции $I_x = 1.413\text{e}4\text{см}^4$
	ст.момент $S_x = 528.\text{см}^3$	мом.инерции $I_y = 7094.\text{см}^4$
	св.круч. $I_t = 34.9\text{см}^4$	сект.момент $I_w = 5.820\text{e}5\text{см}^6$
	мом.сопр. $W = 943.\text{см}^3$	мом.сопр.сж $W_c = 922.1\text{см}^3$
Материал балки	сталь С345	
	мод.упруг. $E = 206.\text{ГПа}$	мод.сдвига $G = 79.2\text{ГПа}$
	сопр.изг. $R_y = 315.\text{МПа}$	сопр.сдвигу $R_s = 183.\text{МПа}$

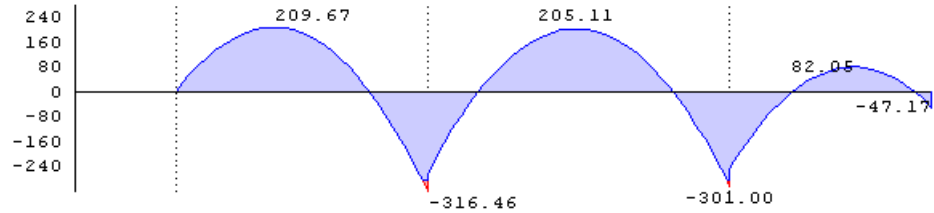
Выводится изображение основного профиля и, если сечение балки состоит из нескольких элементов, то - изображение составного сечения. Для расчетного сечения выводятся все геометрические характеристики, необходимые для расчета прочности и устойчивости, а также характеристики материала балки.

#### Результаты расчета прочности балки:

Результаты расчета балки 1-го класса по СП 53-102-2004,  $\gamma_m = 0.90$   
 Критическое РСУ **N нагр коэф. пролеты**  
 1 1 1.00 л123

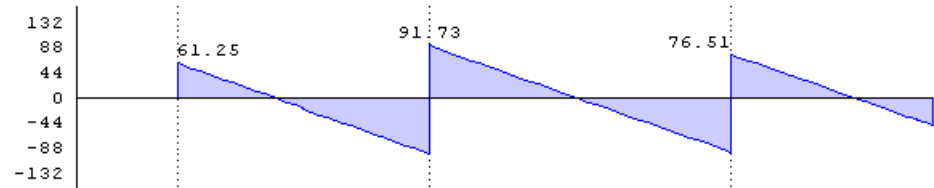
Расчет на прочность макс. момент  $M = 292 \text{ кНм}$  в опоре В при РСУ N 1  
 условие (35)  $M / (W * R_y * \gamma_m) = 1.12$  **УСЛОВИЕ НЕ ВЫПОЛНЕНО!**

Напряжения нормальные  $\sigma_x$  [МПа]  
 M = 1 :140



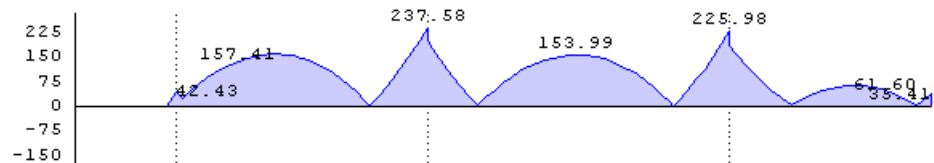
условие (36) макс. попер. сила  $Q = 313 \text{ кН}$  в опоре В при РСУ N 1  
 $Q * S / (I * t_w * R_s * \gamma_m) = 0.59$  условие выполнено

Напряжения касательные  $\tau_{xy}$  [МПа]  
 M = 1 :140



условие (38) макс. эквивалентн. напряжения в опоре В при РСУ N 1  
 $\sigma_x = 273 \text{ МПа}$   $\sigma_y = 0 \text{ МПа}$   $\tau_{xy} = -78 \text{ МПа}$   
 $\sigma_{\text{экв}} / (R_y * \gamma_m) = 0.84$  условие выполнено

Напряжения эквивалентные  $\sigma_{\text{экв}}$  [МПа]  
 M = 1 :140

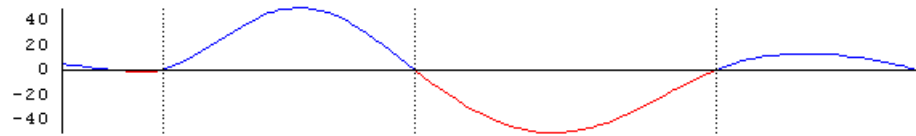


Для балки 1-го класса (только упругая работа сечения) выводятся графические изображения распределений по длине балки максимальных нормальных, касательных и эквивалентных напряжений, а также результаты расчета прочности по формулам (28), (29), (33) СНиП II-23-81\* или (35), (36), (38) СП 53-102-2004 или (41) - (44) СП 16.13330.2011. Если не задана установка ребер жесткости, то проверяется также прочность стенок балки в точках приложения сосредоточенных сил и в опорных сечениях по формулам (31) СНиП II-23-81\* или (40) СП 53-102-2004 или (46) СП 16.13330.2011. Если допускаются пластические деформации (балка 2-го класса), то проверка прочности производится по формулам (39), (41) СНиП II-23-81\* или (44), (48) СП 53-102-2004 или (50), (54) СП 16.13330.2011. Участки балки, на которых нарушаются соответствующие условия прочности, отображаются на графиках красным цветом.

### Результаты расчета устойчивости балки:

Устойчивость балки наиболее опасное РСУ № 1 макс.момент  $M = 137 \text{ кНм}$   
 коэффци.  $\psi_i = 2.84$  коэф.устойч.  $f_{i_b} = 0.44$   
 условие (62)  $M / (f_{i_b} * W_c * R_y * \gamma_c) = 2.32$  УСЛОВИЕ НЕ ВЫПОЛНЕНО!

форма потери устойчивости [условные единицы]  
 $M = 1 : 140$



Ребра жесткости

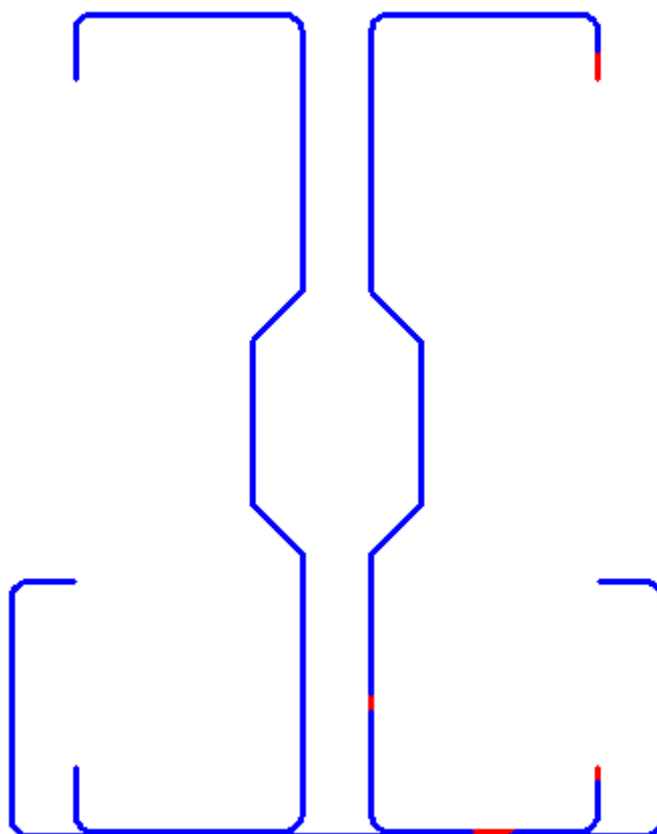
лет	Про [м]	коор. [см]	кол. шаг	РСУ	M [кНм]	Q [кН]	F [кН/м]	гамма
1	0.00	9	50	2	75.6	35.8	474.5	0.31
2	2.50	3	56	1	-16.5	-88.3	0.0	0.33
2	4.18	2	41	1	-110.6	-119.2	0.0	0.63
3	0.00	10	56	1	-102.6	112.9	-821.4	0.63
3	5.60	1	40	3	-84.4	-113.4	0.0	0.53
4	0.00	6	56	3	-80.7	88.4	-707.6	0.49
4	3.36	2	32	2	-15.9	-67.4	0.0	0.20
4	4.00	1	0	4	-0.2	-1.3	0.0	0.00

Для наиболее опасного РСУ выводится результат проверки устойчивости плоской формы изгиба по формуле (34) СНИП II-23-81\* или (62) СП 53-102-2004 или (69), (70) СП 16.13330.2011, а также форма потери устойчивости для угла закручивания сечения. Для установленных программой или пользователем поперечных ребер жесткости выводятся результаты проверки устойчивости стенки в отсеках между ребрами. При наличии нескольких последовательных отсеков с одинаковым шагом, проверка выводится для наименее устойчивого из них.

## Литература

1. СНиП II-23-81\*. Стальные конструкции/Госстрой СССР. – М., ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.
2. СП 53-102-2004. Общие правила проектирования стальных конструкций/Госстрой России. – М., ФГУП ЦПП, 2005. – 132 с.
3. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия / Госстрой СССР. – М., ЦИТП Госстроя СССР, 1987. – 36 с.
4. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81\* «Стальные конструкции») /ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. – М., ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 148 с.
5. СП 16.13330.2011 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81\* - М., ОАО ЦПП, 2011. -171с.
6. СП 20.13330.2011 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\* - М., ОАО ЦПП, 2011. -80с.

### 330 – Несущий элемент из тонкостенных гнутых профилей



Программа предназначена для расчета стальных стержневых несущих элементов, сечение которых состоит из тонкостенных холодногнутых оцинкованных профилей швеллерного типа. Расчеты прочности и устойчивости элемента проводятся в соответствии с требованиями СНиП II-23-81\* [1] и СП 53-102-2004 [2]. В тех случаях, когда соотношение длины линейных участков профиля и его толщины не обеспечивает локальной устойчивости стенки и/или полки, производится редуцирование сечения и расчет с уменьшенными прочностными характеристиками.

## 1. Расчетная схема

В программе рассматриваются три расчетных схемы: однопролетная защемленная балка, однопролетная свободно опертая балка и участок стержня между закреплениями.

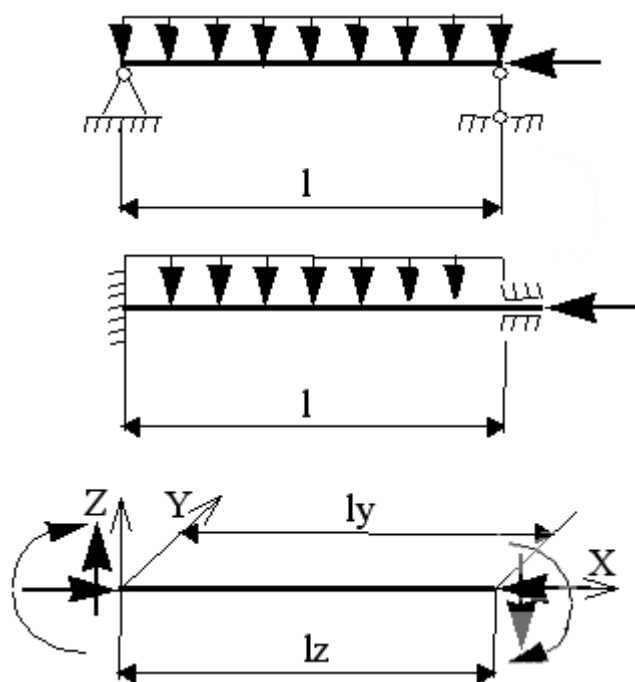


Рис. 1

## 2. Нагрузки

В программе задаются расчетные сочетания усилий. Варианты приложения нагрузок приведены на рис.2. Нагрузки считаются приложенными в центре кручения сечения.

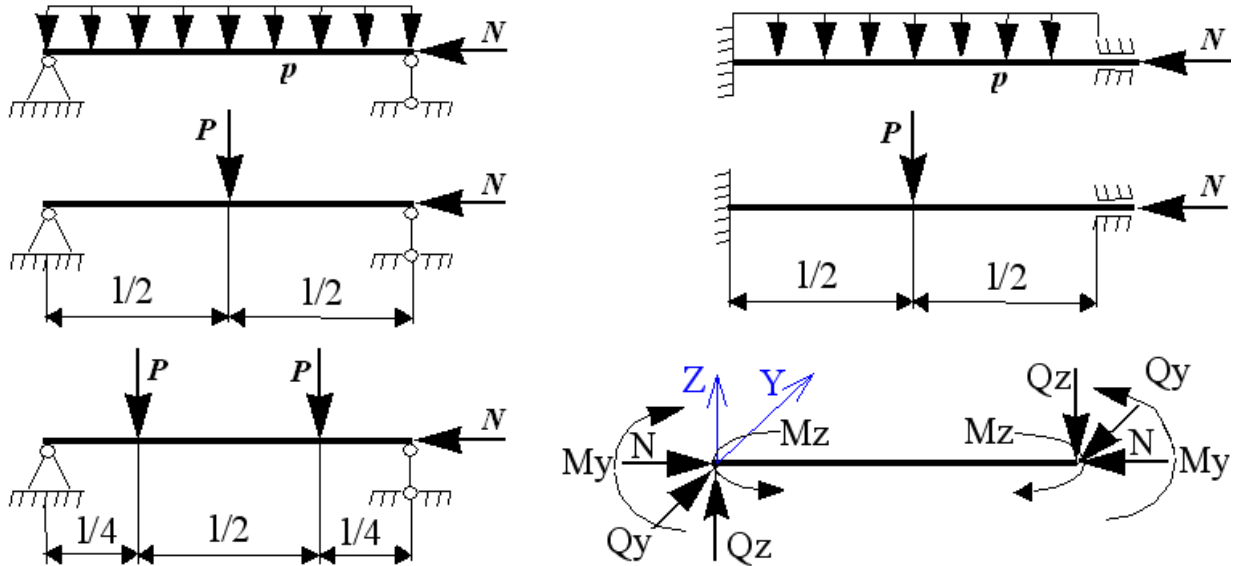


Рис. 2

## 3. Сечение

Возможен расчет элемента, состоящий как из одиночного профиля, так и составленного из двух, трех или четырех профилей. Возможные варианты составных сечений приведены на рис.3.

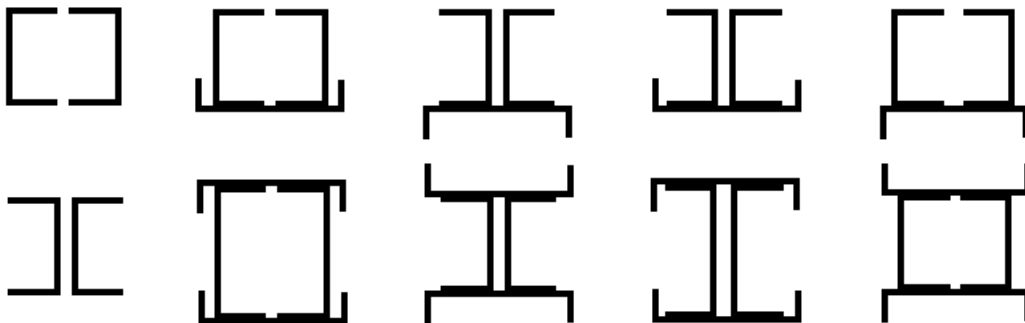


Рис. 3

Горизонтально и вертикально расположенные профили различны. Форма и размеры профилей задаются пользователем и, в зависимости от наличия и величины тех или иных параметров, могут приобретать различный вид, как это показано на рис.4. Сечение всегда считается расположенным таким образом, что  $I_y \geq I_z$ .

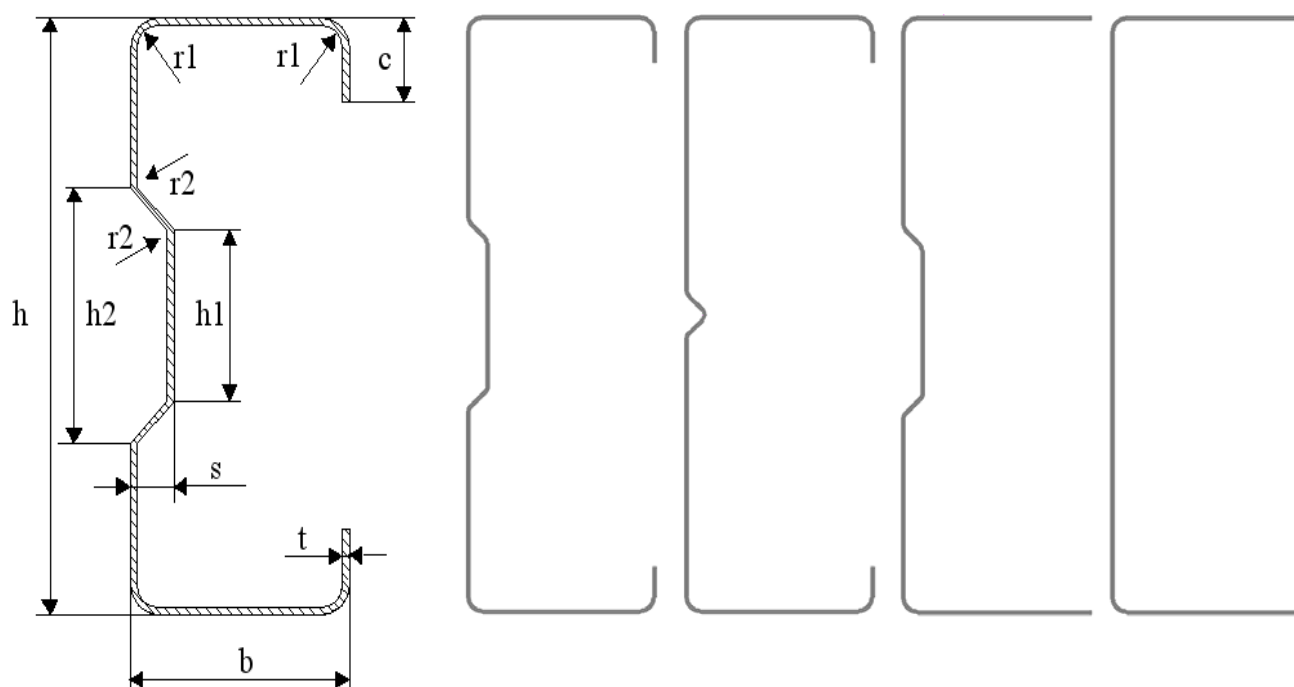


Рис. 4

#### 4. Расчет

Расчет элемента с исходным сечением осуществляется в соответствии с требованиями СНиП II-23-81\* и СП 53-102-2004. То есть, если расчетная схема и нагрузки таковы, что необходимо провести расчет изгибаемого элемента, то производятся проверки по нормальным, касательным и эквивалентным напряжениям по пп. 5.12, 5.14, 5.17 СНиП II-23-81\*, а также проверка устойчивости плоской формы изгиба (ПФИ) по 5.15 СНиП II-23-81\*. Сжато изгибаемые элементы проверяются по нормальным напряжениям (формула (50) 5.25 СНиП II-23-81\*). Затем, в зависимости от величин эксцентриситетов по пп. 5.3 или 5.27 СНиП II-23-81\*, на устойчивость в обеих плоскостях. Коэффициенты продольного изгиба в программе рассчитываются тем же способом, как и при составлении таблиц 72-74 СНиП II-23-81\*, описанным в пп. 5.7, 5.35 Пособия [3]. В зависимости от наличия или отсутствия в нагрузке момента  $M_z$ , элемент проверяется либо на устойчивость при совместном действии нагрузок в разных плоскостях (п. 5.34 СНиП II-23-81\*), либо на потерю устойчивости из плоскости максимальной жесткости (п. 5.30 СНиП II-23-81\*).

#### 5. Редуцирование сечения

В элементах из тонкостенных гнутых профилей, как правило, не соблюдаются соотношения между шириной полки и/или высотой стенки и толщиной профиля, обеспечивающие их локальную устойчивость. Это приводит к локальному выпучиванию отдельных участков элемента, как это показано на рис.5. Локальная потеря устойчивости отдельных участков элемента не приводит к исчерпанию его несущей способности, но должна быть каким-то образом учтена при расчете последней. В СНиП II-23-81\* это учитывается в п. 7.20\* путем редуцирования (уменьшения) площади сечения элемента. К сожалению, в СНиП II-23-81\* приведено правило редуцирования только для одного частного случая: центрального сжатия. Правила редуцирования сечения для общего случая нагружения элемента изложены в Еврокоде 3 [4]. Из рис.6 видно, что правила редуцирования сечения в единственном, изложенном в СНиП II-23-81\* случае, совпадают с правилами Еврокода 3, поскольку получаются из решения одной и той же задачи механики, при этом в СНиП II-23-81\* вместо



непосредственного решения приведена его кусочная интерполяция. Это позволяет использовать правила редуцирования сечения, изложенные в Еврокоде 3, и в общем случае нагружения элемента.

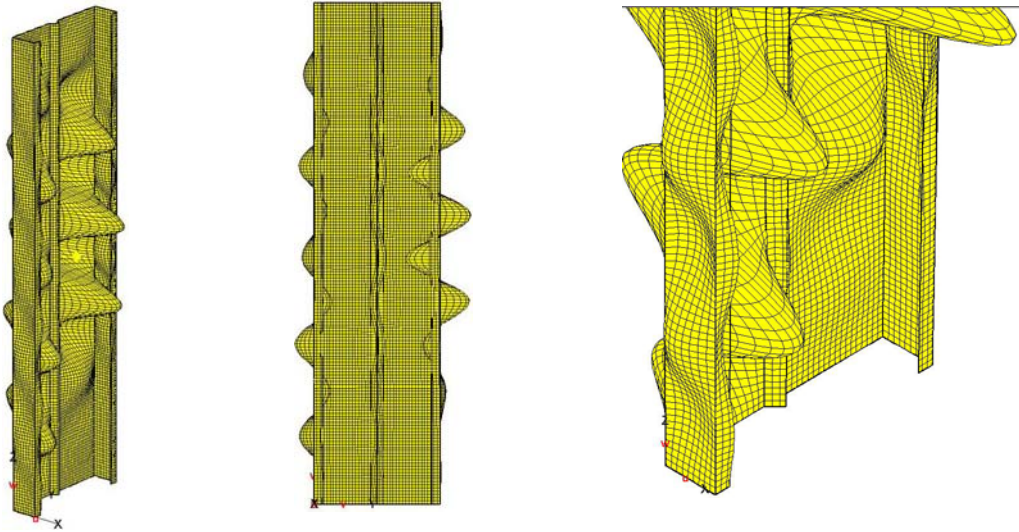


Рис. 5

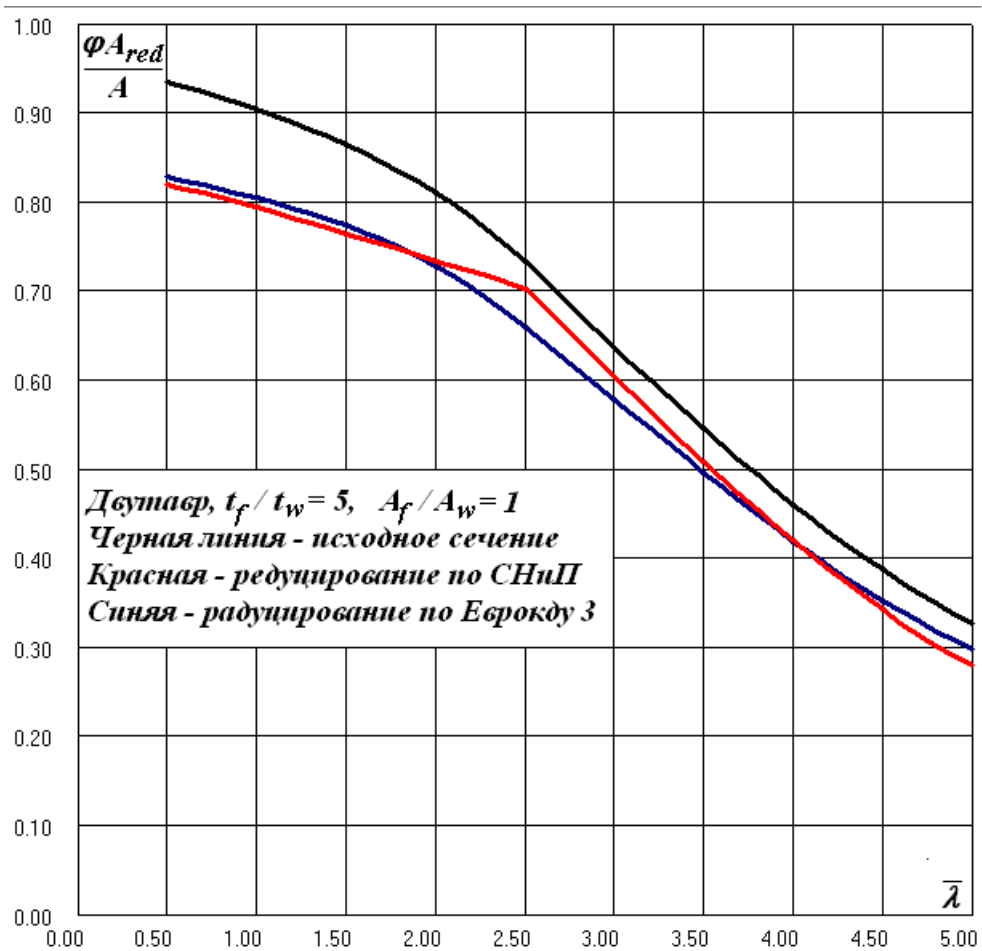


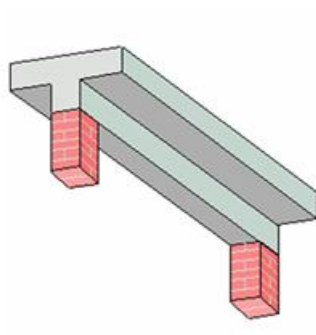
Рис. 6

Редуцирование сечения производится по фактическому напряженному состоянию элемента с использованием итераций так, чтобы распределение напряжений в сечении, учитываемое при определении отбрасываемых участков, соответствовало характеристикам редуцированного сечения, как этого требуют правила Еврокода 3. Элемент с редуцированным сечением проверяется на прочность и устойчивость аналогично элементу с исходным сечением, как это описано в разделе 4.

## Литература

1. СНиП II-23-81\*, Стальные конструкции. Госстрой СССР, 1982.
2. СП 53-102-2004, Общие правила проектирования стальных конструкций. ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 2004.
3. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81\*). ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 1989.
4. EN 1993-1-3:2004, Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004.

## 403 – Подбор поперечной арматуры (Еврокод 2)



Программа предназначена для расчета поперечной арматуры, требуемой для обеспечения прочности при действии поперечной силы согласно ТКП EN 1992-1-1 [1]. Предусмотрены два вида расчета: расчет по заданным усилиям в сечении и расчет для сечений приопорного участка балки. При расчете второго вида, производится конструирование вертикальной поперечной арматуры и выводится изображение приопорной части с подобранными хомутами. Допускается задание бетона и/или арматурной стали с ненормированной прочностью.

## 1. Расчетная схема и нагрузки

Рассматривается изгиб балки прямоугольного или таврового (двутаврового) сечения в вертикальной плоскости. Предусмотрены два вида расчета: расчет по заданным усилиям в сечении и расчет для сечений приопорного участка балки.

При расчете второго вида, в качестве координаты произвольного поперечного сечения применяется расстояние  $x$  от опоры. Задаются изгибающий момент  $M_o$  и поперечная сила  $V_o$ , действующие в сечении балки над гранью опоры. Предусмотрен ввод равномерно распределенной поперечной нагрузки интенсивности  $q$  и сосредоточенных поперечных сил  $Q$ , действующих на верхней грани балки. Предполагается, что нагрузки  $q$  и  $Q$  направлены вертикально вниз. Изгибающий момент и поперечная сила в произвольном поперечном сечении определяются по усилиям в опорном сечении и заданным нагрузкам на основе уравнений равновесия. При этом величина момента  $M_o$  принимается отрицательной. Усилия в опорном сечении и нагрузки в пролете должны соответствовать расчетной комбинации воздействий, образованной согласно [2]. Расчетные комбинации воздействий подразделяются на основные и особые.

## 2. Расчет

Проверка несущей способности балки без учета поперечной арматуры проводится согласно [1], 6.2.2 по формулам (6.2):

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,c}$$

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d$$

$$V_{Rd,c} \geq (v_{\min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d$$

Здесь  $V_{Ed}$  - расчетное значение поперечной силы,  $b_w$  - наименьшая ширина растянутой зоны сечения,  $d$  - рабочая высота сечения,  $f_{ck}$  - характеристическое значение прочности бетона при сжатии (в Н/мм<sup>2</sup>),  $C_{Rd,c} = 0.18 / \gamma_c$ ,  $\gamma_c$  - коэффициент безопасности для бетона, зависящий от вида расчетной комбинации воздействий,  $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2$  ( $d$  в мм),  $\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w d} \leq 0.02$ ,  $A_{sl}$  - площадь растянутой продольной арматуры, которая заведена за рассматриваемое сечение как минимум на расстояние  $l_{bd} + d$ ,  $k_1 = 0.15$ ,  $\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} \leq 0.2 f_{cd}$ ,  $N_{Ed}$  - расчетное значение продольной силы (положительное при сжатии),  $A_c$  - площадь бетонного сечения,  $f_{cd}$  - расчетное значение прочности бетона ( $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c$ ),  $v_{\min} = 0.035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2}$ .

В тех случаях, когда при действии сжимающей продольной силы не возникают трещины (т.е.  $\varepsilon_c \leq \frac{f_{ctd}}{E_{cm}}$ , где  $f_{ctd} = \frac{f_{ctk}}{\gamma_c}$ ,  $f_{ctk}$  - характеристическое значение прочности бетона при

растяжении,  $E_{cm}$  - модуль упругости бетона), сопротивление поперечной силе определяется по формуле [1], (6.4):

$$V_{Rd,c} = \frac{Ib_w}{S} \sqrt{f_{ctd}^2 + \sigma_{cp} f_{ctd}}$$

Здесь  $I$  - момент инерции бетонного сечения относительно центральной оси,  $S$  - статический момент площади бетонного сечения, расположенной над центральной осью.

На участках балки, на которых выполняется условие  $V_{Ed} \leq V_{Rd,c}$ , поперечная арматура по расчету не требуется. На этих участках должна устанавливаться минимальная поперечная арматура, площадь которой определяется по формуле:

$$a_{sw,min} = \min \frac{A_{sw}}{S} = 0.08 \sqrt{f_{ck}} / f_{ywk} b_w$$

Здесь  $A_{sw} = n\pi d_{sw}^2 / 4$  - площадь сечения вертикальной поперечной арматуры,  $n$  - число ветвей поперечной арматуры,  $d_{sw}$  - диаметр поперечной арматуры,  $s$  - шаг поперечной арматуры,  $f_{ywk}$  - характеристическое значение предела текучести поперечной арматуры в Н/мм<sup>2</sup>. Погонная площадь  $a_{sw}$  определяется в см<sup>2</sup>/м. Шаг вертикальной поперечной арматуры ограничивается сверху значением  $s_{max} = 0.75d$ . Расстояние  $s_i$  между ветвями поперечной арматуры в сечении должно удовлетворять условиям  $s_i \leq 0.75d$ ,  $s_i \leq 600$  мм.

Согласно [1], 6.2.1 (8) для элементов, несущих преимущественно равномерную нагрузку, не требуется проводить проверки прочности для сечений, удаленных от опоры на расстояние, меньшее рабочей высоты сечения  $d$ . Однако, в опорном сечении требуется проводить проверку по условию  $V_{Ed} \leq V_{Rd,max}$ , где  $V_{Rd,max}$  - максимальное значение поперечной силы.

Проверка несущей способности балки с учетом вертикальной поперечной арматуры проводится согласно [1], 6.2.3:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,s}$$

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,max}$$

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{ywd} \cot \theta$$

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} b_w z v_1 f_{cd} / (\cot \theta + \tan \theta)$$

$$1 \leq \cot \theta \leq 2.5$$

Здесь  $z$  - плечо внутренних сил, определяемое на основе ферменной модели,  $f_{ywd} = \frac{f_{ywk}}{\gamma_s}$  -

расчетное значение предела текучести поперечной арматуры,  $\gamma_s$  - коэффициент безопасности для арматуры, зависящий от вида расчетной комбинации воздействий.

При отсутствии сжимающей продольной силы коэффициент  $\alpha_{cw}$  принимается равным 1, а при ее наличии вычисляется по формулам:

$$\alpha_{cw} = 1 + \sigma_{cp} / f_{cd} \quad \text{при} \quad 0 < \sigma_{cp} \leq 0.25 f_{cd}$$

$$\alpha_{cw} = 1.25 \quad \text{при} \quad 0.25 f_{cd} < \sigma_{cp} \leq 0.5 f_{cd}$$

$$\alpha_{cw} = 2.5(1 - \sigma_{cp} / f_{cd}) \quad \text{при} \quad 0.5 f_{cd} < \sigma_{cp}$$

где  $\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c}$ . Коэффициент уменьшения прочности бетона  $\nu_1$  принимается равным  $0.6(1 - f_{ck}/250)$ .

Плечо внутренних сил  $z$  определяется согласно [1], рис.6.5, как расстояние между усилием  $F_{td}$  в растянутой продольной арматуре и усилием  $F_{cd}$  в сжатом бетоне по формуле  $z = z_1 + z_2$ , где  $z_1, z_2$  - расстояния от усилий  $F_{td}$  и  $F_{cd}$  до центра тяжести бетонного сечения,  $z_2 = \frac{M - F_{td}z_1}{N + F_{td}}$ ,  $F_{td} = \sigma_t A_{sl}$ . Напряжение  $\sigma_t$  в растянутой арматуре определяется при помощи расчета напряженно-деформированного состояния балки по усилиям  $N, M$ . Указанный расчет проводится на основе диаграмм деформирования сжатого бетона и арматуры без учета работы растянутого бетона.

Максимальная величина поперечной силы, воспринимаемой без разрушения сжатого бетона, равна  $V_{Rd,max}$ . Значение  $V_{Rd,max}$  уменьшается при увеличении  $\cot\theta$ . Если поперечная сила  $V$  превышает значение  $V_{Rd,max}$  при  $\cot\theta = 1$ , то несущая способность балки не может быть обеспечена при помощи поперечного армирования. Если поперечная сила  $V$  меньше значения  $V_{Rd,max}$  при  $\cot\theta = 2.5$ , то расчет проводится при  $\cot\theta = 2.5$ . В противном случае, определяется значение  $\cot\theta$ , при котором  $V = V_{Rd,max}$ . Требуемая площадь поперечной арматуры определяется по формуле:

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V}{z f_{ywd} \cot\theta}$$

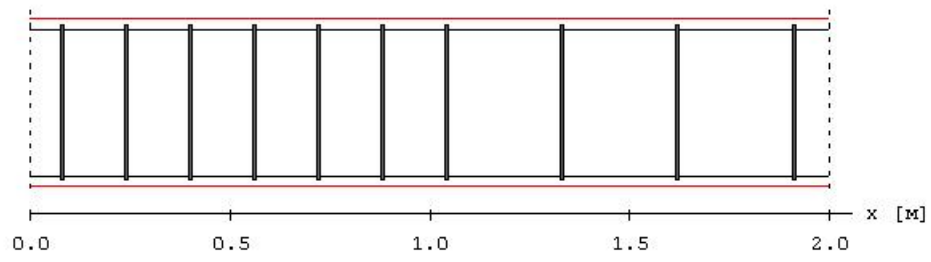
### 3. Конструирование

При конструировании хомутов применяются следующие данные: диаметр хомутов, число ветвей хомутов, максимальный шаг хомутов, приращение шага хомутов, а также расстояние от грани опоры до оси первого хомута.

Подбор хомутов заключается в определении шага хомутов и длин участков, на которых хомуты устанавливаются с постоянным шагом. Шаг хомутов на первом от опоры участке определяется по наибольшему значению требуемой погонной площади арматуры  $(A_{sw}/s)_{max}$ . Шаг хомутов ограничивается заданным при вводе максимальным значением шага. На втором от опоры участке шаг хомутов может быть принят тем же или, если это возможно, увеличен на заданное приращение шага. Для определения числа хомутов требуется задать расстояние от грани опоры до оси первого хомута. Это расстояние может быть задано равным половине шага или полному шагу хомутов. Иное смещение должно задаваться вводом соответствующего положительного или отрицательного значения. При задании отрицательного смещения первый хомут устанавливается в надопорной части балки. Абсолютная величина заданного смещения принимается не большей, чем  $h/2$  ( $h$  - высота сечения).

При задании приращения шага хомутов может быть введено как положительное, так и нулевое или отрицательное значение. В случае ввода отрицательного значения, конструирование производится без изменения шага хомутов. При вводе нулевого значения, автоматически определяется такое приращение шага, при котором общее число хомутов является минимально возможным.

По результатам конструирования выводится изображение приопорного участка балки с подобранными хомутами.

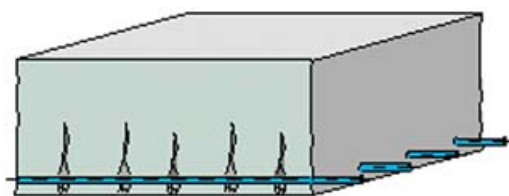




## Литература

1. ТКП EN 1992-1-1: Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций – Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий.
2. СТБ EN 1990-2007: Еврокод. Основы проектирования несущих конструкций.

## 404 – Расчет по трещиностойкости (Еврокод 2)



Программа предназначена для расчёта по образованию и раскрытию трещин согласно ТКП EN 1992-1-1 [1]. Допускается задание бетона и/или арматурной стали с ненормированной прочностью.

## 1. Сечение

Рассматриваются прямоугольное сечение, тавровое или двутавровое сечение (рис.1).

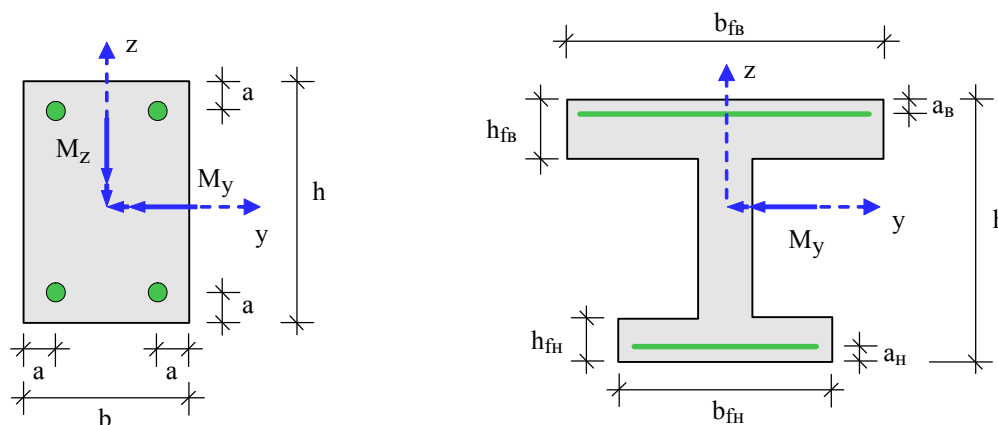


Рис. 1. Сечения

Для прямоугольного сечения рассматриваются следующие схемы армирования  $A$  (рис.2): арматура располагается в углах сечения ( $A=0$ ), арматура располагается равномерно вдоль контура сечения ( $A=1$ ), арматура располагается вблизи верхней и нижней сторон сечения ( $A=2$ ). Для таврового (двутаврового) сечения рассматривается схема  $A=2$ .

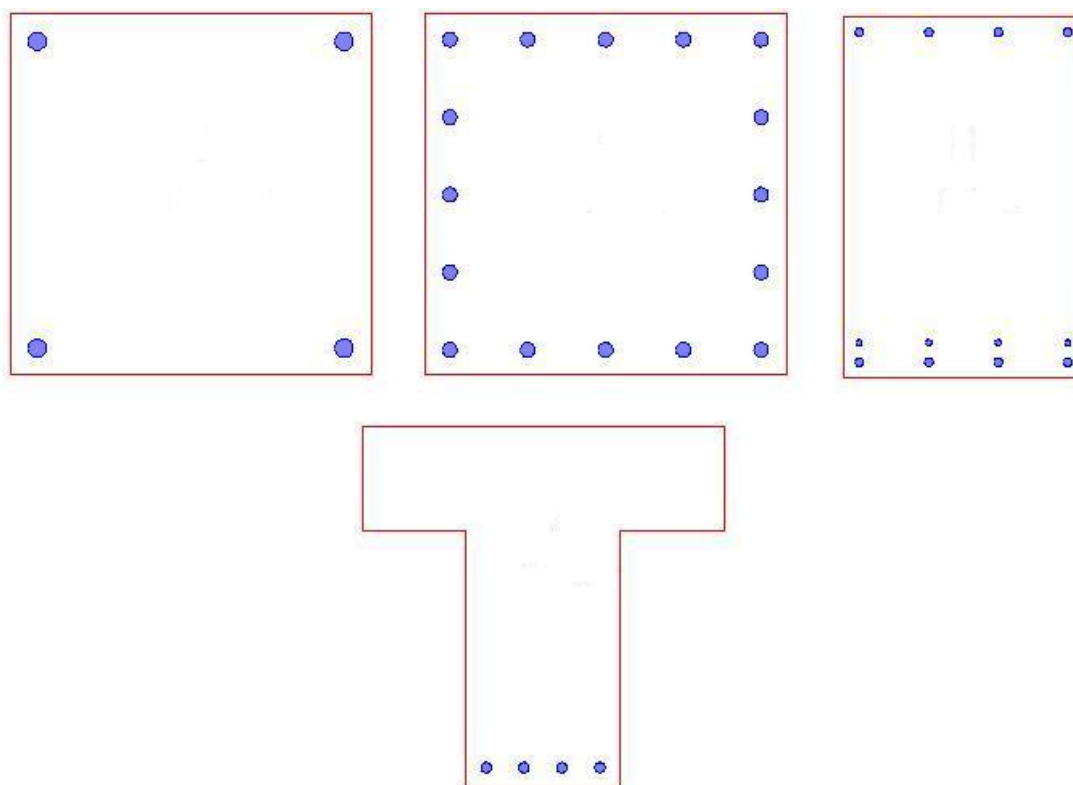


Рис. 2. Схемы армирования

Предусмотрены два варианта задания арматуры: задание числа стержней и их диаметров или задание площадей арматуры.

## 2. Усилия

Продольная сила и изгибающие моменты задаются относительно главных центральных осей  $y, z$  бетонного сечения. Принимается, что продольная сила  $N$  положительна при сжатии. При действии положительного момента  $M_y$  сжатая зона возникает в верхней части сечения, а при действии положительного момента  $M_z$  сжатая зона возникает в левой части сечения. При расчете по трещиностойкости усилия соответствуют практически постоянным комбинациям воздействий, образованным согласно [2].

Предусмотрены два вида задания усилий: задание усилий от комбинаций воздействий и задание усилий от воздействий. В первом случае, задаются сочетания усилий, которые возникают при действии практически постоянных комбинаций воздействий. Во втором случае, задаются воздействия и соответствующие им усилия. Для заданных воздействий генерируется множество возможных практически постоянных комбинаций воздействий, и определяются соответствующие им сочетания усилий. Расчет может проводиться для всех сочетаний усилий или только для сочетаний усилий, выбранных по наибольшим значениям положительных и отрицательных изгибающих моментов, а также эксцентриситетов  $e = M / N$ .

## 3. Определение минимальной площади арматуры

Минимальная площадь растянутой арматуры, требуемая для восприятия вынужденной деформации и собственных напряжений, определяется для прямоугольного сечения при схеме армирования  $A = 2$  и для таврового (двутаврового) сечения согласно 7.3.2 по формуле (7.1):

$$A_{s,\min} = k_c k f_{ctm} A_{ct} / \sigma_s$$

Здесь  $A_{ct}$  - площадь растянутой зоны сечения непосредственно перед образованием трещин,  $\sigma_s$  - напряжение в растянутой арматуре сразу после образования трещин,  $f_{ctm}$  - прочность бетона при растяжении. Значение  $A_{ct}$  определяется при расчете напряженно-деформированного состояния по усилиям трещинообразования  $N_{cr}, M_{cr}$  с учетом работы растянутого бетона, напряжение в котором изменяется по закону  $\sigma = E_{cm} \varepsilon$ . Значение  $\sigma_s$  определяется при аналогичном расчете, но без учета работы растянутого бетона. Коэффициент  $k$  равен 1.0 при  $h \leq 30$  см и равен 0.65 при  $h \geq 80$  см. Для промежуточных значений  $h$  применяется линейная интерполяция. Коэффициент  $k_c$  определяется по формуле:

$$k_c = 0.4 \left\{ 1 - \frac{\sigma_c}{k_1 (h/h^*) f_{ctm}} \right\} \leq 1$$

Здесь  $\sigma_c$  - напряжение от продольной силы  $N$ ,  $k_1 = 1.5$  при  $N > 0$  и  $k_1 = 2h^*/3h$  при  $N < 0$ ,  $h^* = h$  при  $h < 100$  см и  $h^* = 100$  см при  $h \geq 100$  см.

## 4. Расчет ширины раскрытия трещин

Ширина раскрытия трещин определяется согласно [1], 7.3.4 по формуле:

$$w_k = (k_3 c + k_1 k_2 k_4 d_s \rho_{p,eff}) [\sigma_s - k_t f_{ctm} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff}) / \rho_{p,eff}] / E_s$$

при условии  $[\sigma_s - k_t f_{ctm} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff}) / \rho_{p,eff}] / E_s \geq 0.6 \sigma_s / E_s$

Здесь  $c$  - толщина защитного слоя бетона,  $d_s$  - расчетный диаметр арматуры, равный диаметру стержней при однорядном размещении стержней, и равный  $(n_1 d_{s1}^2 + n_2 d_{s2}^2) / (n_1 d_{s1} + n_2 d_{s2})$  при двухрядном размещении стержней;  $\rho_{p,eff} = A_s / A_{c,eff}$ ,  $\sigma_s$  - напряжение в растянутой арматуре, определяемое для заданных сочетаний усилий при расчете напряженно-деформированного состояния без учета работы растянутого бетона;  $f_{ctm}$  - прочность бетона при растяжении,  $\alpha_e = E_s / E_{cm}$ ,  $E_s$  - модуль упругости арматуры,  $E_{cm}$  - модуль упругости бетона,  $k_t = 0.4$ ,  $k_1 = 0.8$ ,  $k_2 = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) / 2\varepsilon_1$ ,  $k_3 = 3.4$ ,  $k_4 = 0.425$ . Коэффициент  $k_2$  определяется по значениям наибольшей деформации  $\varepsilon_1$  и наименьшей деформации  $\varepsilon_2$  в зоне растяжения. При наличии сжатой зоны  $\varepsilon_2 = 0$  и, следовательно,  $k_2 = 0.5$ .

Значение  $\rho_{p,eff}$  определяется через эффективную площадь растяжения  $A_{c,eff}$ , высота которой равна  $h_{c,ef} = 2.5a$ , где  $a$  - расстояние от стороны сечения до центра тяжести площади арматуры. Значение  $h_{c,ef}$  ограничивается по условию  $h_{c,ef} \leq (h-x)/3$  согласно [1], 7.3.2, (3). Здесь  $(h-x)$  - полная высота зоны растяжения. Кроме того, должно выполняться условие  $h_{c,ef} \leq h/2$ . В программе предусмотрена возможность учета более слабого условия  $h_{c,ef} \leq (h-x)/2$ , принятого в DIN 1045-1. Высота зоны растяжения  $(h-x)$  определяется при расчете напряженно-деформированного состояния с учетом работы растянутого бетона при усилиях трещинообразования  $N_{cr}, M_{cr}$ . Площадь растянутой арматуры  $A_s$  определяется как площадь арматуры, расположенной в пределах эффективной площади растяжения  $A_{c,eff}$ .

Расчет ширины раскрытия трещин производится, если при заданных сочетаниях усилий наибольшая деформация растянутого бетона превышает деформацию  $\varepsilon_{ct} = f_{ctm} / E_{cm}$ . Усилия, при которых достигается деформация  $\varepsilon_{ct}$ , являются усилиями трещинообразования  $N_{cr}, M_{cr}$ . Значения  $N_{cr}, M_{cr}$  определяются по заданным усилиям либо при  $N = const$ , либо при  $M/N = const$ . Если продольная сила и изгибающий момент возникают от действия разных источников нагрузок, то следует положить  $N = const$ , а если они возникают от действия одного источника нагрузок, то следует положить  $e = M/N = const$ .

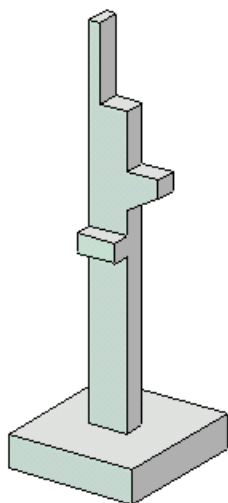
При расчете усилий трещинообразования и при расчете напряженно-деформированного состояния для сжатого бетона применяется параболическая диаграмма деформирования.

В случае прямоугольного сечения со схемой армирования  $A=0$  или  $A=1$  предусмотрен ввод двух изгибающих моментов  $M_y, M_z$ . Расчет усилий трещинообразования и ширины раскрытия трещин в этом случае производится отдельно для сочетаний  $N, M_y$  и  $N, M_z$ .

## Литература

1. ТКП EN 1992-1-1: Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций – Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий.
2. СТБ EN 1990-2007: Еврокод. Основы проектирования несущих конструкций.

## 406 – Многоярусная колонна общего вида



Программа предназначена для проектирования статически неопределимой железобетонной колонны общего вида согласно СНиП 2.03.01-84\* [1], СП 52-101-2003 [2], СНБ 5.03.01-02 [3], [4], [5] и Eurocode 2 [10]. При расчете по [2] нагрузки могут задаваться и комбинироваться согласно СНиП 2.01.07-85\* или СП 20.13330.2011. Предусмотрены два метода расчета колонны. По первому методу усилия в колонне определяются по недеформированной схеме при помощи метода условных критических сил. По второму методу усилия определяются по деформированной схеме с учетом неупругих свойств бетона и арматурной стали, а также с учетом несовершенств колонны и деформаций ползучести бетона. Расчет согласно [1] проводится только по первому методу. По найденным усилиям рассчитывается требуемая площадь продольной арматуры и производится конструирование арматуры с учетом требований по толщине защитного слоя бетона. Осуществляется графический вывод сечений с подобранными арматурными стержнями. Предусмотрен расчет прогибов колонны с подобранной арматурой.

## 1. Расчетная схема

Расчетная схема колонны представляет собой последовательность стержневых элементов (частей) произвольного сечения (рис.1). Разбиение колонны на части необходимо при наличии различных сечений, а также для подбора арматуры различной площади или различных диаметров на различных частях колонны. Части нумеруются в направлении снизу вверх. Возможно задание до 50 частей. При расчете колонны применяется глобальная система координат  $x, y, z$ , начало которой совпадает с центром тяжести нижнего сечения колонны. Ось  $x$  направлена снизу вверх. На каждой части колонны вводится локальная система координат, вертикальная ось которой совпадает с линией центров тяжести сечений данной части, а горизонтальные оси параллельны осям  $y, z$ . Учитывается смещение вертикальной оси части колонны по отношению к оси нижерасположенной части. Главные центральные оси сечений могут быть не параллельны осям  $y, z$  (например, при несимметричных сечениях).

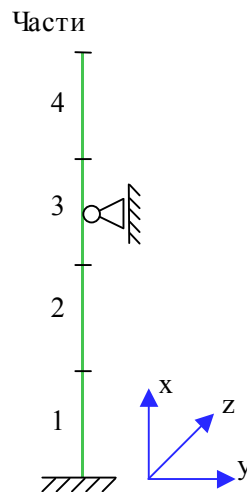


Рис. 1. Расчетная схема

Предполагается, что результирующая вертикальная сила воспринимается в нижней опоре. Условия упругого или абсолютно жесткого закрепления могут задаваться в произвольных точках. Они формулируются для горизонтального перемещения и поворота сечения вокруг горизонтальной оси. Возможен выбор частных расчетных схем, для которых не требуется явно задавать условия закрепления. На рис.6 даны формулы для определения коэффициентов жесткости упругих связей колонны с присоединенными к ней элементами конструкции. Возможен учет податливости основания при помощи коэффициентов жесткости закрепления



нижнего края колонны относительно поворотов. Коэффициенты жесткости приближенно определяются по размерам фундаментной плиты и модулю деформации основания.

## 2. Сечения

На различных частях колонны могут задаваться различные сечения, отличающиеся по форме или по арматуре. Сечение может задаваться как стандартное сечение (прямоугольное, круговое или кольцевое сечение) или как произвольное полигональное сечение (рис.2).

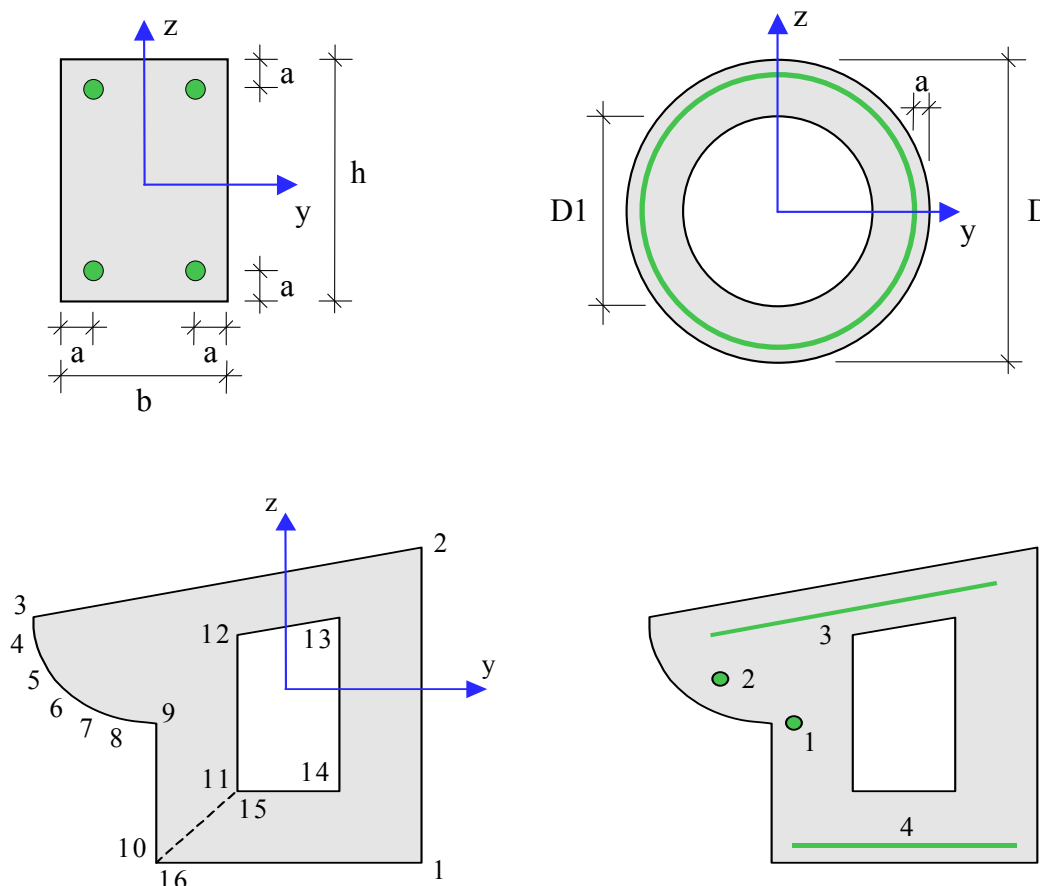


Рис. 2. Сечения

Для прямоугольного сечения возможны следующие схемы армирования  $A$  (рис.3): схема с равными площадями арматуры вблизи вершин сечения ( $A = 0$ ), схема с равномерным распределением площади арматуры вдоль контура сечения ( $A = 1$ ), схема с равными площадями арматуры вблизи верхней и нижней сторон сечения ( $A = 2$ ), схема с равными площадями арматуры вблизи левой и правой сторон сечения ( $A = 3$ ).

Для кругового и кольцевого сечений рассматривается схема армирования с равномерным распределением площади арматуры вдоль контура сечения.

Задание произвольного полигонального сечения осуществляется путем ввода координат его вершин. Возможен ввод до 50 вершин. Выбор координатных осей декартовой системы может быть произвольным. Вершины задаются в последовательности, которая соответствует обходу полигона по контуру в определенном направлении. При этом полигональная область должна оставаться по одну сторону (например, слева) от направления обхода. При наличии внутренних полостей в сечении требуется произвести разрезы, позволяющие обойти граничные контуры (внешний и внутренние) так, чтобы область оставалась по одну сторону от направления обхода.

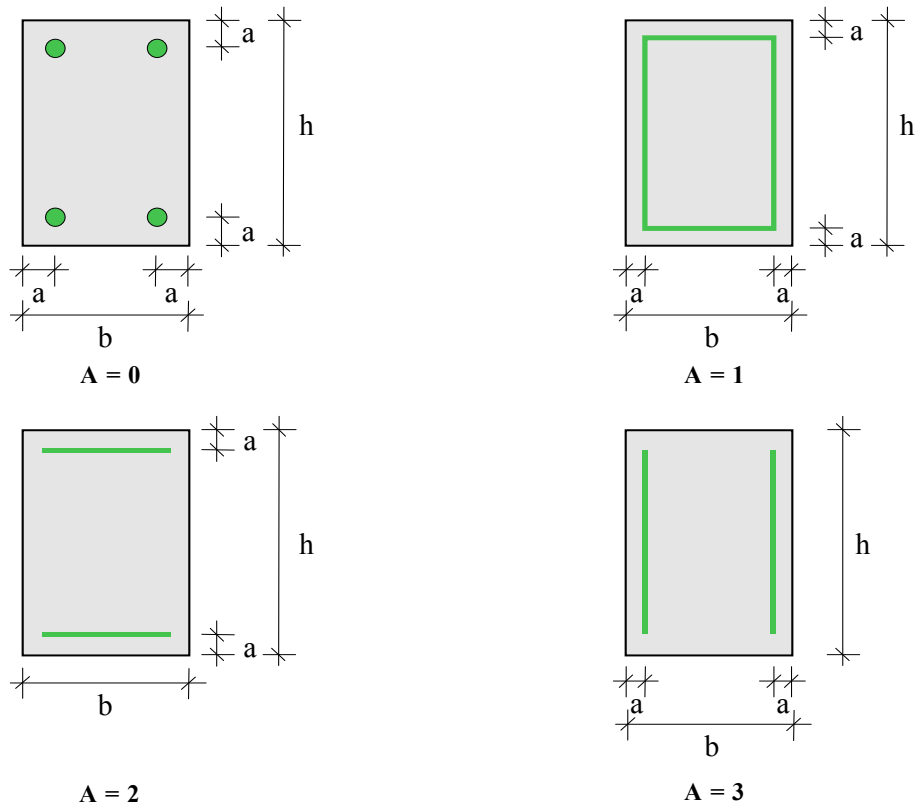


Рис. 3. Схемы армирования прямоугольного сечения

Для полигонального сечения возможны следующие схемы армирования: схема с равными площадями арматуры вблизи вершин внешнего контура сечения ( $A = 0$ ), схема с равномерным распределением площади арматуры вдоль внешнего контура сечения ( $A = 1$ ), произвольная схема армирования. Для схем  $A = 0$  и  $A = 1$  необходимые для расчета координаты арматуры определяются автоматически. При  $A = 0$  исключаются из рассмотрения входящие углы (т.е. углы, большие 180 град). Кроме того, проверяется возможность корректного размещения арматурных стержней при наличии близких вершин.

При выборе произвольной схемы армирования требуется задать отрезки (арматурные слои), на которых размещается арматура. Возможен ввод до 50 арматурных слоев. Слои могут иметь произвольную длину и ориентацию. Предполагается, что площадь арматуры равномерно распределена по слою. Если длина слоя равна нулю, то такой слой соответствует «сосредоточенной» площади арматуры. Арматурные слои подразделяются на слои с варьируемой площадью и слои с постоянной площадью (неизменяемой при расчете требуемой арматуры). Для каждого арматурного слоя с варьируемой площадью определяется его доля от общей площади арматуры (при этом слои с постоянной площадью не учитываются). Доля слоя рассчитывается по заданным относительным площадям как  $k_i = A_i / (A_1 + A_2 + \dots)$ , где  $i = 1, 2, \dots$ ;  $A_1, A_2, \dots$  – относительные площади арматурных слоев с варьируемой площадью. Площадь  $i$ -го слоя определяется по формуле  $A_{si} = k_i \cdot A_{s,tot}$ , где  $A_{s,tot}$  – общая площадь арматуры (без учета постоянной площади). При помощи расчета отыскивается общая площадь арматуры  $A_{s,tot}$ , а затем по коэффициентам  $k_i$  вычисляются площади арматурных слоев  $A_{si}$ .

### 3. Нагрузки

Возможны следующие нагрузки: сосредоточенные вертикальные и горизонтальные силы, сосредоточенные моменты, распределенные горизонтальные и вертикальные нагрузки, смещения и повороты жестких опор. Возможен автоматический учет собственного веса колонны. Положительные направления нагрузок показаны на рис.4. Положительные направления смещений жестких опор совпадают с направлениями координатных осей. Положительные направления поворотов жестких опор совпадают с положительными направлениями моментов.

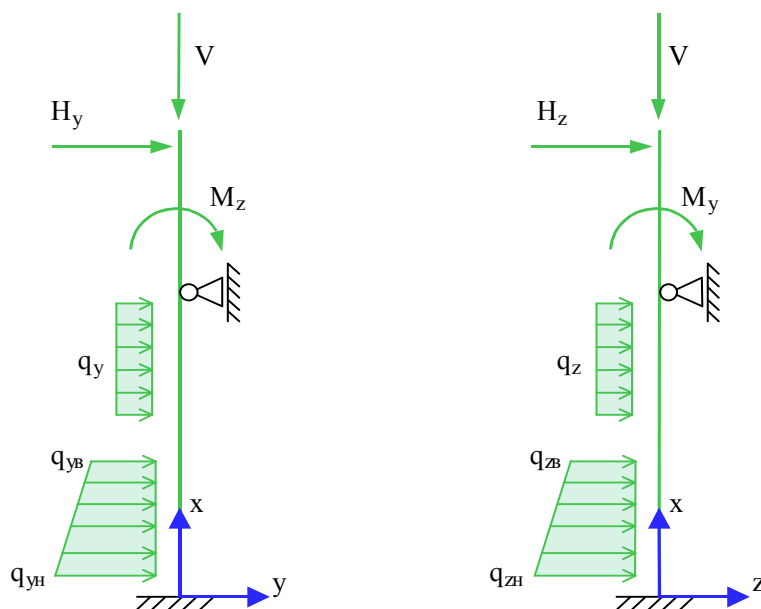


Рис. 4. Положительные направления нагрузок

При расчете по [1] классификация и комбинирование нагрузок принимаются согласно СНиП 2.01.07-85\* «Нагрузки и воздействия» [5]. При расчете по [2] предусмотрено применение СНиП [5] или СП [12]. Нагрузки подразделяются на постоянные, длительные, кратковременные и особые. Комбинирование нагрузок представляет собой генерацию множества возможных комбинаций нагрузок с учетом коэффициентов надежности по нагрузке  $\gamma_f$  и коэффициентов, связанных с одновременным учетом двух и более временных нагрузок. При наличии особых нагрузок, наряду с основными комбинациями, генерируются также особые комбинации. При учете деформаций ползучести бетона для каждой расчетной комбинации определяется соответствующая комбинация длительно действующих нормативных нагрузок. При этом постоянные и длительные нагрузки входят с полным значением, а кратковременные нагрузки учитываются с коэффициентом длительной части  $K_f$ .

При расчете по [3] классификация и комбинирование нагрузок принимаются согласно Приложению А. Нагрузки подразделяются на постоянные, переменные и особые, а комбинации нагрузок - на основные (А.4) и особые (А.5). Частные коэффициенты безопасности  $\gamma_F$  для нагрузок принимаются по таблице А.2. Комбинационные коэффициенты  $\psi_0, \psi_1, \psi_2$  для переменных нагрузок принимаются по таблице А.1. Предусмотрен ввод нестандартных значений  $\gamma_F, \psi_0, \psi_1, \psi_2$  для отдельных нагрузок. Комбинирование нагрузок представляет собой генерацию множества основных и особых комбинаций нагрузок с учетом благоприятного и неблагоприятного эффекта от нагрузок, а также возможности доминирования каждой из переменных нагрузок. При учете деформаций ползучести бетона для каждой расчетной

комбинации определяется по (А.8) соответствующая практически постоянная комбинация нагрузок.

Аналогичное комбинирование нагрузок (воздействий) производится при расчете по Eurocode 2. При этом классификация воздействий принимается согласно [11], Приложение А.1.

Возможен ввод несочетаемых нагрузок. Такие нагрузки включаются в группу несочетаемых нагрузок. В комбинацию может войти только одна нагрузка из каждой группы. Нумерация групп начинается с единицы. Группы могут применяться, в частности, при учете ветровых нагрузок (при рассмотрении действия ветра по различным направлениям) и крановых нагрузок (при рассмотрении различных положений крана).

Возможен ввод знакопеременных нагрузок. В этом случае в расчете учитывается как заданная нагрузка, так и нагрузка противоположного знака.

Для сокращения вычислений и объема выходного документа программы предусмотрен выбор комбинаций нагрузок. При расчете колонны по недеформированной схеме выбираются такие комбинации, для которых изгибающие моменты (или эксцентриситеты) принимают наибольшие значения. При расчете по деформированной схеме предусмотрены два метода выбора комбинаций нагрузок. По первому методу выбираются такие комбинации нагрузок, для которых требуемая площадь арматуры принимает наибольшее значение в одном из сечений колонны. При этом требуемая площадь арматуры определяется без учета нижней границы коэффициента армирования по усилиям, найденным при помощи линейного расчета по деформированной схеме с учетом несовершенств колонны, но без учета ползучести бетона. Необходимые для расчета арматуры расстояния от граней сечения до центров тяжести площадей арматуры определяются по заданным наибольшим диаметрам стержней. По второму методу выбираются такие комбинации нагрузок, для которых усилия или прогибы принимают наибольшие положительные значения (max-значения) или наибольшие по модулю отрицательные значения (min-значения). Если при выборе комбинаций нагрузок по первому методу требуемая площадь арматуры оказывается равной нулю для всех комбинаций нагрузок, то автоматически осуществляется выбор комбинаций по второму методу.

Возможен ввод готовых расчетных комбинаций нагрузок. Задаваемая как вид нагрузки расчетная комбинация добавляется к множеству сгенерированных основных комбинаций нагрузок. В частности, возможен ввод лишь готовых комбинаций нагрузок. При расчете для готовых комбинаций не производится учет деформаций ползучести. Готовые комбинации не ставятся в расчет прогибов колонны с подобранной арматурой.

## 4. Расчет по недеформированной схеме

### 4.1 Расчет согласно СНиП и СНБ

В каждой координатной плоскости влияние прогиба на величину расчетного момента учитывается путем умножения изгибающего момента  $M$  на повышающий коэффициент  $\eta$ . Такой подход называется в [7] (стр.106) способом критических сил. Коэффициент  $\eta$  вычисляется по формуле:

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

где  $N$  - продольная сила,  $N_{cr}$  - критическая сила, которая определяется согласно [1], п.3.24, [2], п.6.2.16, [3], п.7.1.3.14. Формула для критической силы может быть записана в виде:

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

где  $D$  - жесткость колонны,  $l_0$  - расчетная длина. При определении  $D$  по формулам, приведенным в нормах, приближенно учитываются неупругие свойства бетона, наличие трещин и ползучесть бетона при длительном действии нагрузки. Расчетная длина принимается согласно рекомендациям норм ([1], п.3.25, [2], п.6.2.18, [3], п.7.1.3.8).

Согласно [1] жесткость вычисляется по формуле:

$$D = \frac{6.4}{\pi^2} \left[ \frac{E_b I_b}{\varphi_l} \left( \frac{0.11}{0.1 + \delta_e} + 0.1 \right) + E_s I_s \right]$$

Здесь  $E_b, E_s$  - модули упругости бетона и стали;  $I_b, I_s$  - моменты инерции бетонного сечения и площади сечения арматуры относительно центральной оси сечения,  $\delta_e = e_0 / h$  - относительный эксцентриситет продольной силы ( $h$  - высота сечения в плоскости изгиба),  $\varphi_l = 1 + \beta \cdot M_{ll} / M_l$  - параметр, учитывающий длительное действие нагрузки ( $\beta = const$ ). Согласно [3] жесткость вычисляется аналогичным образом. В [2] формула для жесткости имеет вид:

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

Эксцентриситет  $e_0$  определяется относительно центра тяжести приведенного сечения (при несимметричном армировании центры тяжести бетонного и приведенного сечений не совпадают). При определении  $e_0$  учитывается случайный эксцентриситет  $e_a$  ([1], п.1.21, [2], п.4.2.6, [3], п.7.1.2.11). Согласно [1] и [2] при расчете колонны, являющейся элементом статически определимой конструкции, эксцентриситет  $e_0$  принимается равным  $\frac{M}{N} + e_a$ , а при расчете колонны, являющейся элементом статически неопределимой конструкции, - равным  $\frac{M}{N}$ , если  $\frac{M}{N} \geq e_a$ , и равным  $e_a$ , если  $\frac{M}{N} < e_a$ . Согласно [3] эксцентриситет  $e_0$  всегда принимается равным  $\frac{M}{N} + e_a$ .

Моменты  $M_1, M_{ll}$  вычисляются относительно оси тяжести наиболее растянутой (или наименее сжатой) арматуры по усилиям  $N, M$  от полной нагрузки и по усилиям  $N_l, M_l$  от длительно действующей части нагрузки. При расчете  $N_l, M_l$  согласно [1] и [2] в расчет ставятся постоянные и длительные нагрузки, входящие в рассматриваемую комбинацию, а также длительные части кратковременных нагрузок, вычисляемые по заданным при вводе коэффициентам  $K_l$ . Согласно [3]  $N_l, M_l$  рассчитываются от практически постоянных комбинаций нагрузок. В расчете для готовой комбинации нагрузок принимается, что  $N_l = 0, M_l = 0$ .

Изгибная жесткость  $D$  как величина, зависящая от значений момента  $M$  через параметры  $\varphi_l$  и  $e_0$ , в общем случае изменяется по высоте колонны. Так как  $D$  вычисляется с учетом арматуры, размещенной в сечении, то значения расчетного момента  $\eta M$  также зависят от площади арматуры. Поэтому требуемая арматура может быть рассчитана только при помощи итераций. На текущем итерационном шаге для найденной площади арматуры вычисляются коэффициенты  $\eta_y$  и  $\eta_z$ , затем определяются расчетные моменты  $\eta_y M_y$  и  $\eta_z M_z$ , действующие в плоскостях  $Z$  и  $Y$ , а затем вычисляется требуемая площадь арматуры. Далее выполняется

следующая итерация. Итерационный процесс оканчивается тогда, когда относительное приращение площади арматуры становится менее 0,1%.

При расчете колонны согласно [1], требуемая арматура определяется в соответствии с п.3.28\*. Расчетное сопротивление бетона при сжатии принимается с коэффициентом условий работы бетона  $\gamma_b$ , который определяется как произведение отдельных коэффициентов  $\gamma_{bi}$  согласно таблице 15. При этом коэффициент  $\gamma_{b2}$ , зависящий от длительности действия нагрузки, определяется для каждой комбинации нагрузок по отдельности. Результирующий коэффициент условий работы с учетом коэффициента  $\gamma_{b2}$  не может быть менее 0,45.

При расчете колонны согласно [2] и [3] требуемая арматура определяется на основе нелинейной деформационной модели ([2], п.6.2.21; [3], п.7.1.1.2). При расчете по [2] применяется трехлинейная диаграмма состояния сжатого бетона. Расчет требуемой арматуры по [3] проводится при параболически-линейной диаграмме состояния сжатого бетона.

Предельные усилия выражаются через действующие усилия по формулам:

$$N_u = \gamma_u \cdot N, M_{yu} = \gamma_u \cdot M_y, M_{zu} = \gamma_u \cdot M_z$$

Прочность сечения обеспечена при  $\gamma_u \geq 1$ . Ошибки при расчете требуемой арматуры выводятся тогда, когда они превышают 1%. Появление информации об ошибках возможно, в частности, при расчете требуемой арматуры в произвольном полигональном сечении, если схема армирования задана некорректно.

Предусмотрен автоматический учет минимального коэффициента армирования, который принимается в зависимости от наибольшего значения гибкости колонны  $\lambda_{\max} = \max(\lambda_y, \lambda_z)$  согласно [1], п.5.16, [2], п.8.3.4, [3], п.11.2.2. Гибкость колонны в каждой координатной плоскости вычисляется по формуле  $\lambda = l_0 \sqrt{A_b / I_b}$ .

Возможен расчет требуемой арматуры со ступенчатым распределением. При этом требуемая арматура определяется для каждой части колонны независимо от номера сечения. Требуемая площадь арматуры, в общем случае, оказывается различной на участках колонны с одинаковым номером сечения. Возможно указать части колонны с одинаковой площадью арматуры. При ступенчатом распределении арматуры, как правило, уменьшается общий объем арматуры в колонне.

Возможна проверка несущей способности колонны при заданной арматуре. Для проведения проверки надо ввести сечение колонны как произвольное полигональное с произвольной схемой армирования. Затем ввести арматурные слои и их площади, указав, что они являются постоянными. В этом случае, производится линейный расчет усилий по недеформированной схеме, и определяются расчетные моменты  $\eta M$  в каждой координатной плоскости, а затем проверяется несущая способность сечения. Если заданная площадь арматуры меньше требуемой, то выводится сообщение «Расчет требуемой арматуры невозможен».

Для колонны прямоугольного сечения предусмотрен расчет по прочности наклонных сечений с учетом действия продольной силы. Погонная площадь поперечной арматуры  $A_{sw}/s_w$  рассчитывается согласно [1], пп.3.31\*, 3.32, [2], п.6.2.34, [3], пп.7.2.1.1, 7.2.1.2, 7.2.1.5, 7.2.2.7 - 7.2.2.10. Кроме того, проводится проверка прочности на действие поперечной силы по наклонной полосе между наклонными трещинами. Если условие прочности по наклонной полосе не удовлетворяется, то выводится соответствующее сообщение. При расчете по [1] и [3] площадь арматуры, найденная из условия прочности по наклонной трещине, может быть увеличена для того, чтобы выполнялось условие прочности по наклонной полосе. Условие прочности при косом изгибе принимается согласно [9], п.3.39 в виде:

$$\left( \frac{Q_y}{Q_{b,y} + Q_{sw,y}} \right)^2 + \left( \frac{Q_z}{Q_{b,z} + Q_{sw,z}} \right)^2 \leq 1$$

## 4.2 Расчет согласно Eurocode 2

В каждой координатной плоскости расчетный момент по теории II порядка определяется по формуле (5.30):

$$M_{Ed} = \frac{M_{0Ed}}{1 - N_{Ed} / N_B}$$

где  $M_{0Ed}$  - расчетный момент, определенный по теории I порядка,  $N_{Ed}$  - расчетная продольная сила,  $N_B$  - критическая сила, которая определяется на основе номинальной жесткости. Формула для критической силы может быть записана в виде:

$$N_B = \frac{\pi^2 D}{l_0^2}$$

где  $D$  - номинальная жесткость колонны,  $l_0$  - расчетная длина. Значение  $D$  вычисляется по формуле (5.21):

$$D = K_c E_{cd} I_c + K_s E_s I_s$$

Здесь  $E_{cd} = E_{cm} / \gamma_{cE}$  - расчетное значение модуля упругости бетона,  $\gamma_{cE} = 1.2$ ,  $E_s$  - модуль упругости стали;  $I_c, I_s$  - моменты инерции бетонного сечения и площади сечения арматуры относительно центральной оси сечения. Коэффициенты  $K_c, K_s$  определяются по формулам:

$$K_c = k_1 k_2 / (1 + \varphi_{ef})$$

$$K_s = 1$$

$$k_1 = \sqrt{f_{ck} / 20}$$

$$k_2 = n \frac{\lambda}{170} \leq 0.20$$

$$n = N_{Ed} / (A_c f_{cd})$$

Здесь  $f_{ck}$  - характеристическое значение прочности бетона при сжатии в Н/мм<sup>2</sup>,  $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c$  - расчетное значение прочности бетона,  $A_c$  - площадь сечения,  $\lambda = l_0 / i$  - гибкость,  $i$  - радиус инерции сечения. Коэффициент безопасности для бетона  $\gamma_c$  принимается равным 1.5 при расчете для основной комбинации воздействий и равным 1.2 при расчете для особой комбинации воздействий. Эффективный коэффициент ползучести  $\varphi_{ef}$  принимается равным предельному значению коэффициента ползучести  $\varphi(\infty, t_0)$ . Значение  $\varphi(\infty, t_0)$  определяется согласно [10], Приложение В по значению  $RH$  относительной влажности воздуха окружающей среды и значению  $t_0$  возраста бетона к моменту нагружения.

Предусмотрен автоматический учет минимальной площади арматуры, определяемой по формуле (9.12N):

$$A_{s,min} = \frac{0.10 N_{Ed}}{f_{yd}}$$

где  $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$  - расчетное значение предела текучести стали. Коэффициент безопасности для арматуры  $\gamma_s$  принимается равным 1.15 при расчете для основной комбинации воздействий и равным 1.0 при расчете для особой комбинации воздействий.

## 5. Расчет по деформированной схеме

Предусмотрены два вида расчета усилий: линейный расчет и нелинейный расчет. Линейный расчет основан на модели линейного деформирования бетона и проводится без учета арматуры. В этом случае кривизна (угловой коэффициент эпюры деформаций) в каждой плоскости изгиба выражается по формуле  $\kappa = M / (EI)_b$ . Система уравнений продольно-поперечного изгиба является линейной.

В нелинейном расчете кривизны  $\kappa_y$  и  $\kappa_z$  определяются через усилия на основе диаграмм деформирования сжатого бетона и арматурной стали. При расчете согласно [2] применяется трехлинейная диаграмма состояния бетона, при расчете согласно [3] - криволинейная диаграмма, при расчете согласно Eurocode 2 – диаграмма, приведенная в п.3.1.5. Из-за нелинейного характера зависимости кривизн от усилий, система уравнений продольно-поперечного изгиба является нелинейной. Производная кривизны по изгибающему моменту может рассматриваться как величина, обратная к локальной изгибной жесткости колонны. При наличии трещин жесткость колонны в несколько раз меньше жесткости, вычисленной в предположении упругой работы бетона и арматурной стали. Нелинейный расчет проводится при помощи метода итераций. Итерационный процесс оканчивается тогда, когда относительные приращения моментов, прогибов и площади арматуры становятся менее 1%. Для контроля точности результатов нелинейного расчета усилий выводится итерационная ошибка.

Предусмотрен вывод нагрузок на опоры (они противоположны по знаку реакциям опор). Эти данные могут использоваться при расчете присоединенных к колонне элементов конструкции (в частности, при расчете фундамента).

Для контроля результатов предусмотрена проверка равновесия колонны в деформированном состоянии (т.е. с учетом рассчитанных прогибов), находящейся под действием комбинации нагрузок и реакций связей.

Расчет требуемой арматуры проводится на основе нелинейной деформационной модели ([2], п.6.2.21, [3], п.7.1.1.2). При расчете по [2] применяется трехлинейная диаграмма состояния сжатого бетона. При расчете по [3] применяется либо параболически-линейная диаграмма (при линейном расчете), либо криволинейная диаграмма (при нелинейном расчете). Предельные усилия при линейном расчете определяются как  $R(\alpha f_{ck} / \gamma_c, f_{yk} / \gamma_s)$ , а при нелинейном расчете - как  $R(f_{cR}, f_{yR}) / \gamma_R$ , где  $f_{cR} = \alpha f_{ck}$ ,  $f_{yR} = 1.1 f_{yk}$ ,  $\gamma_R = 1.35$ .

Расчет требуемой арматуры согласно Eurocode 2 проводится при линейном расчете на основе параболической диаграммы, приведенной в п.3.1.7, а при нелинейном расчете на основе диаграммы, полученной из диаграммы в п.3.1.5 заменой  $f_{cm}$  на  $f_{cd}$  и заменой  $E_{cm}$  на  $E_{cd} = E_{cm} / \gamma_{cE}$  при  $\gamma_{cE} = 1.2$ .

Предельные усилия выражаются через действующие усилия по формулам:

$$N_u = \gamma_u \cdot N, M_{yu} = \gamma_u \cdot M_y, M_{zu} = \gamma_u \cdot M_z$$

Прочность сечения обеспечена при  $\gamma_u \geq 1$ . Ошибки при расчете требуемой арматуры выводятся тогда, когда они превышают 1%. Появление информации об ошибках возможно, в частности, при расчете требуемой арматуры в произвольном полигональном сечении, если схема армирования задана некорректно.



Предусмотрен автоматический учет минимального коэффициента армирования, который принимается в зависимости от наибольшего значения гибкости колонны  $\lambda_{\max} = \max(\lambda_y, \lambda_z)$  согласно [2], п.8.3.4, [3], п.11.2.2. Гибкость колонны в каждой координатной плоскости вычисляется по формуле  $\lambda = l_0 \sqrt{A_b / I_b}$ , в которой расчетная длина  $l_0$  определяется для случая приложения вертикальной силы на верхнем краю колонны.

При расчете по Eurocode 2 минимальная площадь арматуры определяется по формуле (9.12N):

$$A_{s,\min} = \frac{0.10N_{Ed}}{f_{yd}}$$

где  $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$  - расчетное значение предела текучести стали. Коэффициент безопасности для арматуры  $\gamma_s$  принимается равным 1.15 при расчете для основной комбинации воздействий и равным 1.0 при расчете для особой комбинации воздействий.

Возможен расчет требуемой арматуры со ступенчатым распределением. При этом требуемая арматура определяется для каждой части колонны независимо от номера сечения. Требуемая площадь арматуры в общем случае оказывается различной на участках колонны с одинаковым номером сечения. Возможно указать части колонны с одинаковой площадью арматуры. При ступенчатом распределении арматуры, как правило, уменьшается общий объем арматуры в колонне.

Возможна проверка несущей способности колонны при заданной арматуре. Для проведения проверки надо ввести сечения колонны как произвольные полигональные с произвольной схемой армирования. Затем ввести арматурные слои и их площади, указав, что они являются постоянными. В этом случае производится нелинейный расчет усилий по деформированной схеме, и для найденных усилий проверяется несущая способность сечений. Если заданные площади арматуры меньше требуемых, то выводится сообщение «Расчет требуемой арматуры невозможен».

Для колонны прямоугольного сечения предусмотрен расчет по прочности наклонных сечений с учетом действия продольной силы. Погонная площадь поперечной арматуры  $A_{sw}/s_w$  рассчитывается согласно [2], п.6.2.34, [3], пп.7.2.1.1, 7.2.1.2, 7.2.1.5, 7.2.2.7 - 7.2.2.10. Кроме того, проводится проверка прочности на действие поперечной силы по наклонной полосе между наклонными трещинами. Если условие прочности по наклонной полосе не удовлетворяется, то выводится соответствующее сообщение. При расчете по [3] площадь арматуры, найденная из условия прочности по наклонной трещине, может быть увеличена для того, чтобы выполнялось условие прочности по наклонной полосе. Условие прочности при косом изгибе принимается согласно [9], п.3.39 в виде:

$$\left( \frac{Q_y}{Q_{b,y} + Q_{sw,y}} \right)^2 + \left( \frac{Q_z}{Q_{b,z} + Q_{sw,z}} \right)^2 \leq 1$$

## 6. Конструирование

Конструирование продольной арматуры в сечениях колонны производится с учетом нормативных требований по защитному слою бетона, за исключением случая полигонального сечения с произвольной схемой армирования. Для учета этих требований расчет колонны проводится дважды. Необходимые для расчета расстояния от центров тяжести площадей арматуры до контура сечения первоначально определяются по заданному наибольшему диаметру стержней с учетом диаметра хомута и заданных минимальных толщин защитного слоя бетона для продольной и поперечной арматуры. По результатам первого расчета колонны производится конструирование арматуры, и корректируются расстояния от центров тяжести

площадей арматуры до контура сечения. Затем проводится повторный расчет колонны и конструирование арматуры. Расстояния от центров тяжести площадей арматуры до контура сечения, для которых при повторном расчете определена требуемая арматура, указываются в выходном документе программы.

При подборе арматурных стержней применяется следующий общий ряд диаметров (в мм): 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 32, 36, 40. Арматурные стержни размещаются в сечении с учетом номинальной толщины защитного слоя бетона и номинального расстояния в свету между стержнями. При определении номинальной толщины защитного слоя бетона учитываются заданные минимальные толщины защитного слоя бетона для продольной и поперечной арматуры, диаметр подобранных стержней и диаметр хомута. При этом толщина защитного слоя бетона для хомута принимается кратной 5 мм. В сечении со схемой армирования  $A = 0$  в каждом углу может размещаться один арматурный стержень или (при необходимости) более (3 или 5 арматурных стержней). При расчете требуемой арматуры применяется расстояние от контура сечения до общего центра тяжести группы стержней.

При подборе арматурных стержней учитываются заданные минимальный и максимальный диаметры стержней, максимальное количество стержней в сечении, минимальное расстояние в свету между стержнями. Эти параметры позволяют управлять подбором арматуры. По результатам конструирования осуществляется графический вывод сечений с подобранными арматурными стержнями.

## 7. Учет несовершенств

При расчете по деформированной схеме для учета влияния таких несовершенств колонны, как непрямолинейность и неперпендикулярность, предусмотрено задание начальных прогибов по формам потери устойчивости или задание отклонений оси колонны от вертикали. Выбор в качестве формы несовершенства колонны формы потери устойчивости объясняется высокой степенью влияния этой формы при больших вертикальных нагрузках. Для каждой координатной плоскости форма потери устойчивости определяется в рамках теории упругой устойчивости для заданного распределения вертикальных нагрузок. По умолчанию, наибольшее значение начального прогиба в каждой плоскости принимается при расчете по [2] и [3] равным случайному эксцентриситету  $e_a$  ([2], п.4.2.6, [3], п.7.1.2.11), а при расчете по Eurocode 2 равным минимальному эксцентриситету ([10], п.6.1(4)). Возможен ввод наибольшего значения начального прогиба. Выбор наиболее неблагоприятной ориентации начального прогиба (выбор знака наибольшего значения) осуществляется для каждой комбинации нагрузок по отдельности. Если задается значение начального прогиба в конкретной точке, то знак заданного значения учитывается.

Отклонение оси колонны от вертикали представляет собой поворот оси вокруг нижней точки. По умолчанию угол отклонения в каждой координатной плоскости принимается равным 1/600 при расчете по [2], [3] и равным 1/400 при расчете по Eurocode 2. Возможен ввод угла отклонения. Выбор наиболее неблагоприятного направления отклонения от вертикали (в направлении координатной оси или в противоположном направлении) осуществляется для каждой комбинации нагрузок по отдельности.

Возможен ввод начальных прогибов произвольной формы. В этом случае, по заданным значениям начального прогиба строится гладкая интерполяционная сплайн-функция.

## 8. Учет деформаций ползучести

Деформации ползучести бетона рассчитываются в рамках линейной теории ползучести [8]. Расчет согласно [2] проводится для комбинации длительно действующих нормативных

нагрузок при коэффициенте ползучести  $\varphi_{b,cr}$ , соответствующем классу бетона по прочности и заданной влажности воздуха окружающей среды. Сначала проводится линейный расчет по деформированной схеме с модулем деформации бетона  $E_{b,\tau} = E_b / (1 + \varphi_{b,cr})$ , отвечающим продолжительному действию нагрузок, а затем проводится аналогичный расчет с начальным модулем упругости  $E_b$ . В этих расчетах учитываются арматура и несовершенства колонны по формам потери устойчивости, рассчитанным для модуля деформации  $E_{b,\tau}$ . Прогибы, вызванные ползучестью бетона, определяются как разность прогибов, полученных в двух указанных расчетах:  $w_{п} = w(E_{b,\tau}) - w(E_b)$ . Прогибы  $w_{п}$  учитываются в основном расчете колонны как начальные прогибы. Аналогично проводится расчет согласно [3] и [10]. При этом в расчет ставятся практически постоянные комбинации нагрузок (воздействий). Предельное значение коэффициента ползучести определяется согласно [3], Приложение Б или [10], Приложение В по значению  $RH$  относительной влажности воздуха окружающей среды и значению  $t_0$  возраста бетона к моменту нагружения.

## 9. Учет второстепенных колонн

Под второстепенными колоннами понимаются шарнирно опертые колонны, воспринимающие вертикальную нагрузку, но не сопротивляющиеся горизонтальной нагрузке. Дополнительная нагрузка на основную колонну, обусловленная нагружением присоединенных к ней второстепенных колонн, пропорциональна прогибу основной колонны (рис.5). Она может быть учтена путем введения пружины отрицательной жесткости. Дополнительная нагрузка действует в направлении прогиба основной колонны. При задании вертикальной нагрузки  $P$  необходимо учитывать коэффициент надежности по нагрузке.

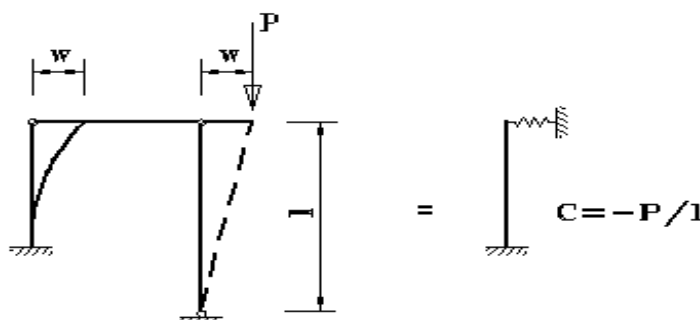


Рис. 5. Учет второстепенной колонны

## 10. Расчет прогибов

Расчет прогибов колонны относится к расчетам по предельным состояниям второй группы. Он проводится после конструирования арматуры. Прогибы определяются при помощи нелинейного расчета по деформированной схеме, в котором учитываются начальные прогибы и прогибы, вызванные ползучестью бетона. Работа растянутого бетона не учитывается. В расчет ставятся площади сечений подобранных арматурных стержней и координаты центров сечений согласно расположению арматурных стержней на рисунках, выводимых в разделе «Конструирование» выходного документа программы. Расчет по [2] проводится для комбинаций нормативных нагрузок, а расчет по [3] и [10] – для практически постоянных комбинаций нагрузок (воздействий). Если расчет колонны по прочности проводится с выбором комбинаций нагрузок, то для расчета прогибов также производится выбор комбинаций. При этом применяется второй метод выбора комбинаций. В табличной и графической формах

выводятся полные прогибы  $w_y, w_z$ , включающие прогибы  $w_{y0}, w_{z0}$ , которые характеризуют несовершенства колонны, и прогибы  $w_{yn}, w_{zn}$ , которые обусловлены ползучестью бетона.

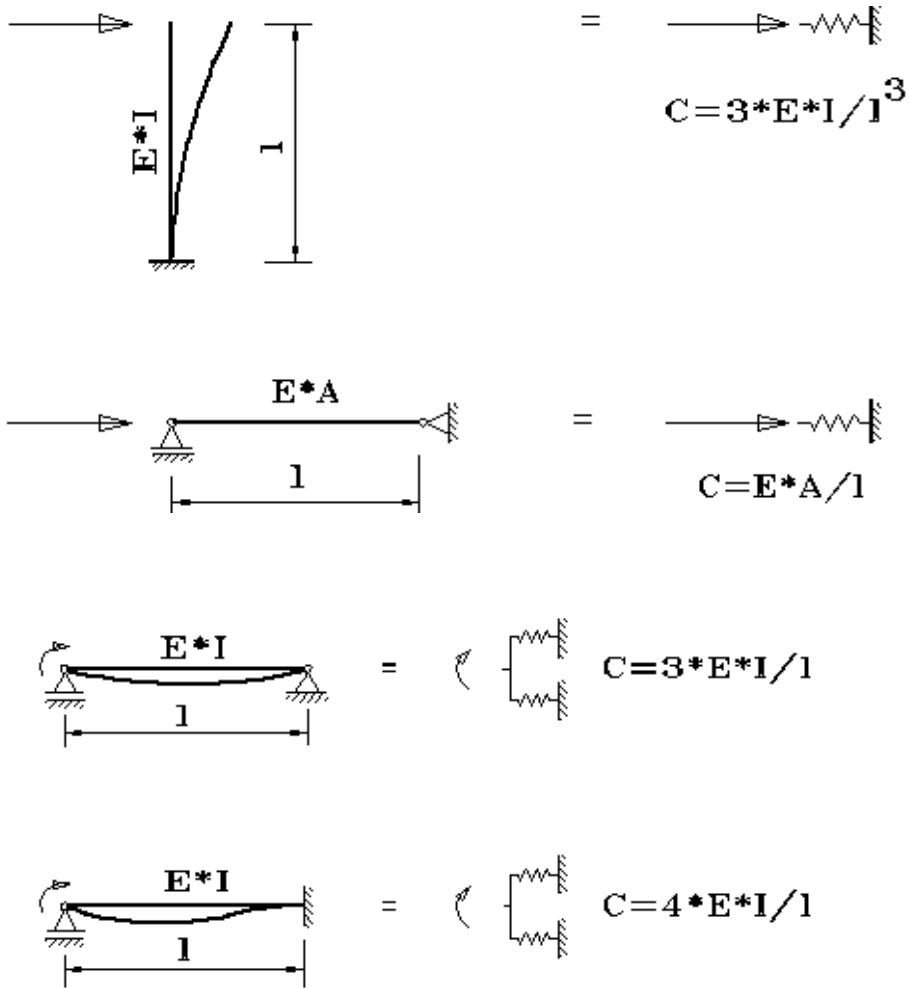
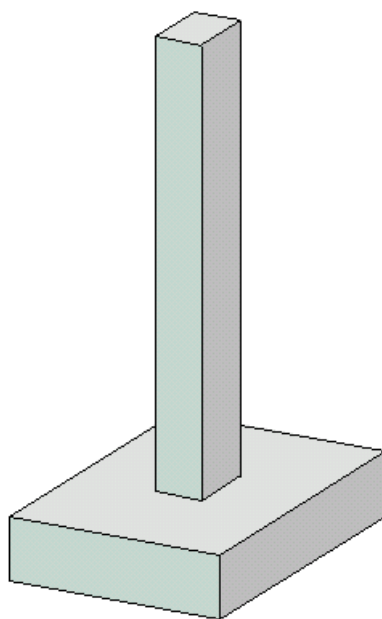


Рис. 6. Коэффициенты жесткости упругих связей

## Литература

1. СНиП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 80 с.
2. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры / ГУП «НИИЖБ», ФГУП ЦПП. – М., 2004.
3. СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2003. – 139 с.
4. Бетонные и железобетонные конструкции (Изменение №1 СНБ 5.03.01-02)/ Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2004.
5. Бетонные и железобетонные конструкции (Изменение №3 СНБ 5.03.-01-02)/ Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2006.
6. СНиП 2.01.07-85\*. Нагрузки и воздействия / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1987. – 36 с.
7. Расчет железобетонных конструкций по прочности, трещиностойкости и деформациям / А.С.Залесов, Э.Н.Кодыш, Л.Л.Лемыш, И.К.Никитин. – М.: Стройиздат, 1988.-320 с.
8. Рекомендации по учету ползучести и усадки бетона при расчете бетонных и железобетонных конструкций / НИИЖБ Госстроя СССР. – М.:Стройиздат,1988. – 120 с.
9. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелых и легких бетонов без предварительного напряжения арматуры (к СНиП 2.03.01-84)/ЦНИИпромзданий Госстроя СССР, НИИЖБ Госстроя СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 192 с.
10. ТКП EN 1992-1-1: Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций – Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий
11. СТБ EN 1990-2007: Еврокод. Основы проектирования несущих конструкций.
12. СП 20.13330.2011: Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\*. – Минрегион России, 2010.

## 407 – Расчет ж/б колонны по огнестойкости



Программа предназначена для расчёта по огнестойкости одноярусной железобетонной колонны согласно СТО НИИЖБ [1] и Eurocode 2 [2], [3]. Усилия в колонне определяются при помощи линейного или нелинейного расчета по деформированной схеме. Температурное поле в сечении колонны 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. Нормативные сопротивления материалов при нормальной температуре принимаются согласно СП 52-101-2003 [4]. Предусмотрена возможность задания материалов с ненормированной прочностью.

## 1. Расчетная схема

Расчетная схема колонны представляет собой стержневой элемент, имеющий упругие или абсолютно жесткие закрепления на одном или обоих краях. 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.

## 2. Сечение

Рассматриваются колонны прямоугольного, круглого, уголкового и таврового сечений. Применяются центральные оси координат  $y, z$  бетонного сечения.

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, в качестве осей координат принимаются оси, направленные по нижней и левой сторонам сечения. Задаются число стержней в ряду и диаметр стержней.

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  $z$ . Предполагается, что число стержней не меньше 6.

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 арматура задается путем ввода рядов стержней.

## 3. Нагрузки

Расчет по огнестойкости проводится для наиболее неблагоприятного сочетания нормативных постоянных и длительных нагрузок согласно СНиП 2.01.07-85\* «Нагрузки и воздействия». В том случае, когда нельзя установить значение нормативной нагрузки, следует принимать ее равной 0,7 от расчетной нагрузки.

Положительные направления нагрузок показаны на рис.1. Положительные направления смещений жестких опор совпадают с направлениями координатных осей. Положительные направления поворотов жестких опор совпадают с положительными направлениями моментов.

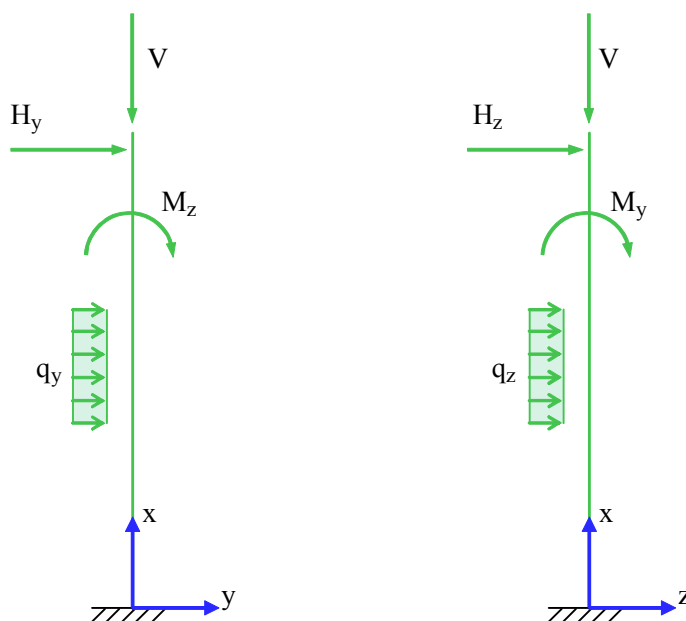


Рис. 1. Положительные направления нагрузок

#### 4. Расчет

Огнестойкость колонны характеризуется периодом времени от начала пожара до момента потери несущей способности. Предельные усилия выражаются через действующие усилия по формулам:

$$N_u = \gamma_u \cdot N, M_{yu} = \gamma_u \cdot M_y, M_{zu} = \gamma_u \cdot M_z$$

Несущая способность исчерпывается, когда предельные усилия  $N_u, M_{yu}, M_{zu}$  в одном из сечений колонны становятся равными расчетным усилиям  $N, M_y, M_z$ .

На первом этапе проводится линейный расчет усилий в колонне по деформированной схеме при нормальной температуре. Если прогиб колонны в плоскости оси  $y$  или оси  $z$  стеснен или невозможен, то для соответствующей плоскости расчет проводится по недеформированной схеме. 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 центрбежному моменту инерции сечения  $I_{yz}$ . Жесткостные характеристики определяются относительно центральных осей приведенного сечения, параллельных центральным осям бетонного сечения. В некоторых случаях армирования, центры тяжести приведенного сечения и бетонного сечения не совпадают. При линейном расчете усилий это обстоятельство не учитывается.

Затем производится выбор сочетаний усилий, для которых проводится расчет по огнестойкости. 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.

На втором этапе расчета для каждого выбранного сочетания усилий в текущий момент времени определяется коэффициент запаса прочности  $\gamma_u$  и строится зависимость наименьшего коэффициента запаса от времени. Предел огнестойкости определяется по моменту времени, при котором  $\gamma_u = 1$ .

Если для требуемого предела огнестойкости  $\gamma_u > 1$ , то проводится следующий этап расчета, на котором усилия в колонне определяются на основе нелинейных зависимостей кривизн от изгибающих моментов. Эти зависимости определяются по диаграммам деформирования сжатого бетона и арматурной стали. Затем выбираются наиболее опасные сочетания усилий, и для них проводится проверка огнестойкости.

#### 4.1 Определение температурного поля

Для определения предела огнестойкости необходимо рассчитать температурное поле в сечении колонны 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  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности,  $c$  - удельная теплоемкость,  $\rho$  - плотность материала. При расчете температуры в сечении колонны не учитывается влияние арматуры.

Огневое воздействие характеризуется зависимостью температуры среды от времени, отсчитываемого от начала пожара. Согласно ГОСТ 30247.0-94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования», 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.2.

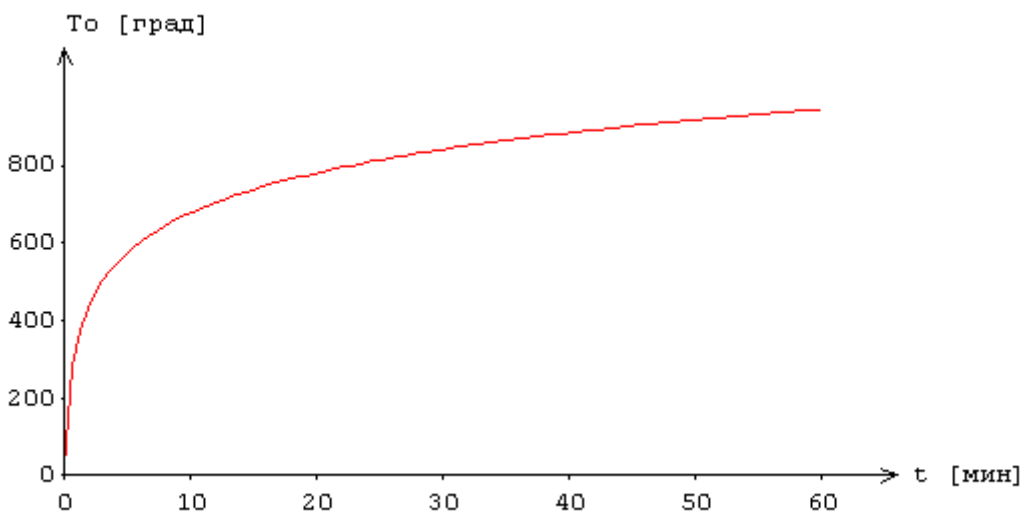


Рис.2. Зависимость температуры среды от времени

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  $\Delta t$  - 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 снижается точность результата.

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

#### 4.2 Определение предельных усилий

Предельные усилия при огневом воздействии определяются на основе диаграмм деформирования сжатого бетона и арматуры. При этом учитывается зависимость диаграмм от температуры. Нормативные сопротивления сжатого бетона и арматуры при нормальной температуре принимаются согласно СП 52-101-2003 [3]. Предусмотрена возможность задания материалов с ненормированной прочностью.

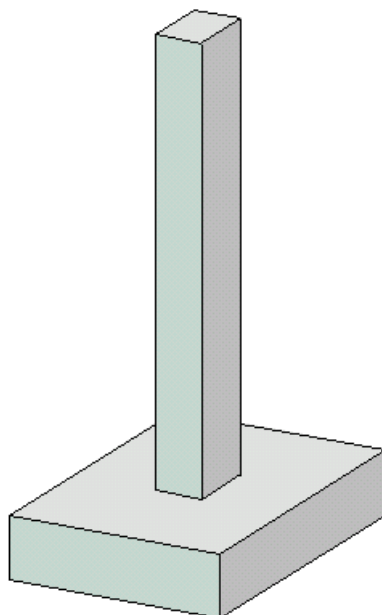
#### 4.3 Нелинейный расчет усилий

В нелинейном расчете кривизны  $\kappa_y$  и  $\kappa_z$  определяются через усилия на основе диаграмм деформирования сжатого бетона и арматурной стали. Из-за нелинейного характера зависимостей кривизн от усилий система уравнений продольно-поперечного изгиба является нелинейной. Производная кривизны по изгибающему моменту может рассматриваться как величина, обратная к локальной изгибной жесткости колонны. Нелинейный расчет проводится при помощи метода итераций. Итерационный процесс оканчивается тогда, когда относительные приращения моментов и прогибов становятся малыми. Для контроля точности результатов нелинейного расчета усилий выводится итерационная ошибка.

### Литература

1. СТО 36554501-006-2006: Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций / ФГУП «НИЦ «Строительство». – М.: ФГУП ЦПП, 2006.
2. DIN EN 1992-1-2: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung fuer den Brandfall. Oktober 2006.
3. DIN EN 1991-1-2: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Brandeinwirkungen auf Tragwerke. September 2003.
4. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры / ГУП «НИИЖБ», ФГУП ЦПП. – М., 2004.

## 410 – Одноярусная колонна общего вида



Программа предназначена для проектирования статически неопределимой одноярусной железобетонной колонны произвольного сечения согласно следующим нормам: СНиП 2.03.01-84\* [1], СП 52-101-2003 [2], СНБ 5.03.01-02 [3], [4] и Eurocode 2 [8]. При расчете по [2] нагрузки могут задаваться и комбинироваться согласно СНиП 2.01.07-85\* или СП 20.13330.2011. Усилия в колонне определяются при помощи линейного расчета по недеформированной схеме, а влияние прогиба учитывается по методу условных критических сил. Рассчитывается требуемая площадь продольной арматуры и производится конструирование арматуры с учетом требований по толщине защитного слоя бетона. Осуществляется графический вывод сечения с подобранными арматурными стержнями.

## 1. Расчетная схема

Расчетная схема колонны представляет собой стержневой элемент произвольного сечения, имеющий упругие или абсолютно жесткие закрепления на одном или обоих краях. 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. Главные центральные оси сечения могут быть не параллельны осям  $y, z$  (например, при несимметричном сечении). Предполагается, что результирующая вертикальная сила воспринимается в нижней опоре. Возможен учет податливости основания при помощи коэффициентов жесткости закрепления нижнего края колонны относительно поворотов. Коэффициенты жесткости приближенно определяются по размерам фундаментной плиты и модулю деформации основания.

## 2. Сечение

Сечение может задаваться как стандартное сечение (прямоугольное, круговое или кольцевое сечение) или как произвольное полигональное сечение (рис.1). Для прямоугольного сечения возможны следующие схемы армирования  $A$  (рис.2): схема с равными площадями арматуры вблизи вершин сечения ( $A = 0$ ), схема с равномерным распределением площади арматуры вдоль контура сечения ( $A = 1$ ), схема с равными площадями арматуры вблизи верхней и нижней сторон сечения ( $A = 2$ ), схема с равными площадями арматуры вблизи левой и правой сторон сечения ( $A = 3$ ). Для кругового и кольцевого сечений рассматривается схема армирования с равномерным распределением площади арматуры вдоль контура сечения.

Задание произвольного полигонального сечения осуществляется путем ввода координат его вершин. Возможен ввод до 50 вершин. Выбор координатных осей декартовой системы может быть произвольным. Вершины задаются в последовательности, которая соответствует обходу полигона по контуру в определенном направлении. При этом полигональная область должна оставаться по одну сторону (например, слева) от направления обхода. При наличии внутренних полостей в сечении требуется произвести разрезы, позволяющие обойти граничные контуры (внешний и внутренние) так, чтобы область оставалась по одну сторону от направления обхода.

Для полигонального сечения возможны следующие схемы армирования: схема с равными площадями арматуры вблизи вершин внешнего контура сечения ( $A = 0$ ), схема с равномерным распределением площади арматуры вдоль внешнего контура сечения ( $A = 1$ ), произвольная схема армирования. Для схем  $A = 0$  и  $A = 1$  необходимые для расчета координаты арматуры определяются автоматически. При  $A = 0$  исключаются из рассмотрения входящие углы (т.е. углы, большие 180 град). Кроме того, проверяется возможность корректного размещения арматурных стержней при наличии близких вершин.

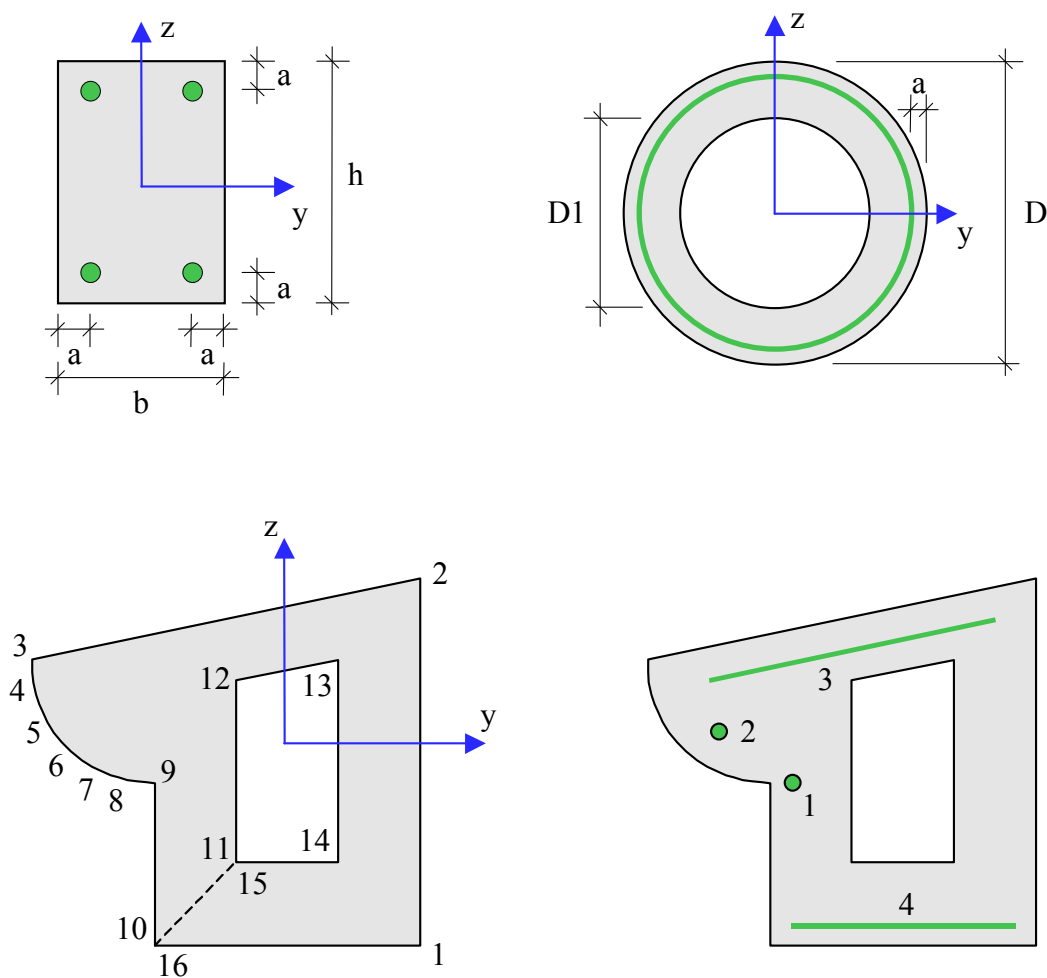


Рис. 1. Сечения

При выборе произвольной схемы армирования требуется задать отрезки (арматурные слои), на которых размещается арматура. Возможен ввод до 50 арматурных слоев. Слои могут иметь произвольную длину и ориентацию. Предполагается, что площадь арматуры равномерно распределена по слою. Если длина слоя равна нулю, то такой слой соответствует «сосредоточенной» площади арматуры. Арматурные слои подразделяются на слои с варьируемой площадью и слои с постоянной площадью (не изменяемой при расчете требуемой арматуры). Для каждого арматурного слоя с варьируемой площадью определяется его доля от общей площади арматуры (при этом слои с постоянной площадью не учитываются). Доля слоя рассчитывается по заданным относительным площадям как  $k_i = A_i / (A_1 + A_2 + \dots)$ , где  $i = 1, 2, \dots$ ;  $A_1, A_2, \dots$  – относительные площади арматурных слоев с варьируемой площадью. Площадь  $i$ -го слоя определяется по формуле  $A_{si} = k_i \cdot A_{s,tot}$ , где  $A_{s,tot}$  – общая площадь арматуры (без учета постоянной площади). При помощи расчета отыскивается общая площадь арматуры  $A_{s,tot}$ , а затем по коэффициентам  $k_i$  вычисляются площади арматурных слоев  $A_{si}$ .

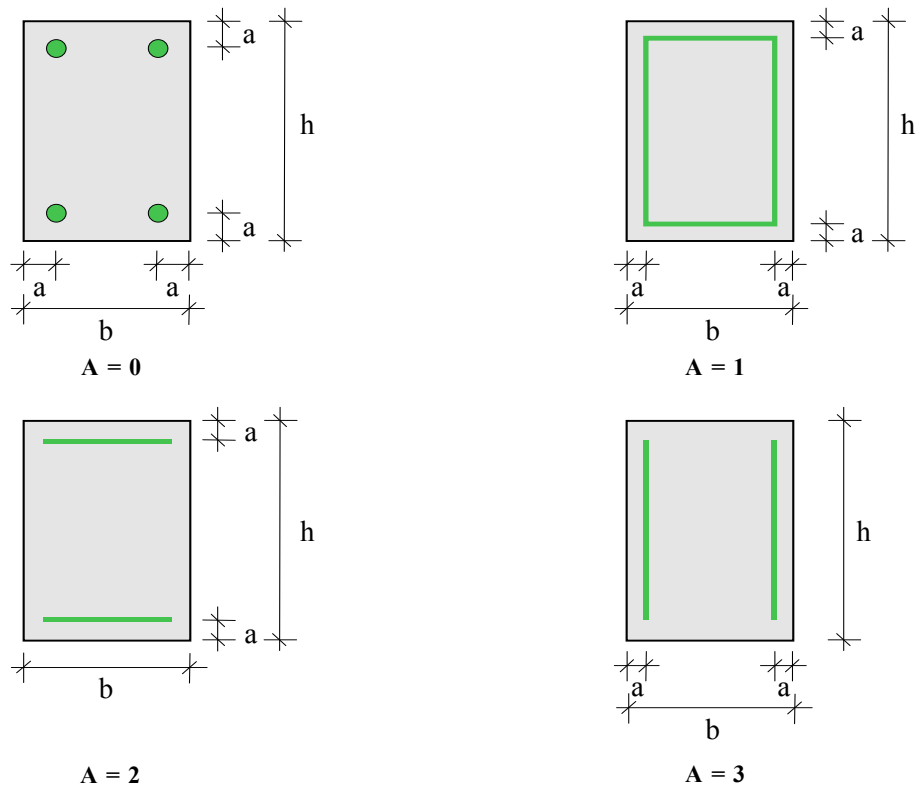


Рис. 2. Схемы армирования прямоугольного сечения

### 3. Нагрузки

Возможны следующие нагрузки: сосредоточенные вертикальные и горизонтальные силы, сосредоточенные моменты, распределенные горизонтальные и вертикальные нагрузки, смещения и повороты жестких опор. Возможен автоматический учет собственного веса колонны. Положительные направления нагрузок показаны на рис.3. Положительные направления смещений жестких опор совпадают с направлениями координатных осей. Положительные направления поворотов жестких опор совпадают с положительными направлениями моментов.

При расчете по [1] классификация и комбинирование нагрузок принимаются согласно СНиП 2.01.07-85\* «Нагрузки и воздействия» [5]. При расчете по [2] предусмотрено применение СНиП [5] или СП [10]. Нагрузки подразделяются на постоянные, длительные, кратковременные и особые. Комбинирование нагрузок представляет собой генерацию множества возможных комбинаций нагрузок с учетом коэффициентов надежности по нагрузке  $\gamma_f$  и коэффициентов, связанных с одновременным учетом двух и более временных нагрузок. При наличии особых нагрузок, наряду с основными комбинациями, генерируются также особые комбинации.

При расчете по [3] классификация и комбинирование нагрузок принимаются согласно Приложению А. Нагрузки подразделяются на постоянные, переменные и особые, а комбинации нагрузок - на основные (А.4) и особые (А.5). Частные коэффициенты безопасности  $\gamma_F$  для нагрузок принимаются по таблице А.2. Комбинационные коэффициенты  $\psi_0, \psi_1, \psi_2$  для переменных нагрузок принимаются по таблице А.1. Предусмотрен ввод нестандартных значений  $\gamma_F, \psi_0, \psi_1, \psi_2$  для отдельных нагрузок. Комбинирование нагрузок представляет собой генерацию множества основных и особых комбинаций нагрузок с учетом благоприятного и

неблагоприятного эффекта от нагрузок, а также возможности доминирования каждой из переменных нагрузок.

Аналогичное комбинирование нагрузок (воздействий) производится при расчете по Eurocode 2. При этом классификация воздействий принимается согласно [9], Приложение А.1.

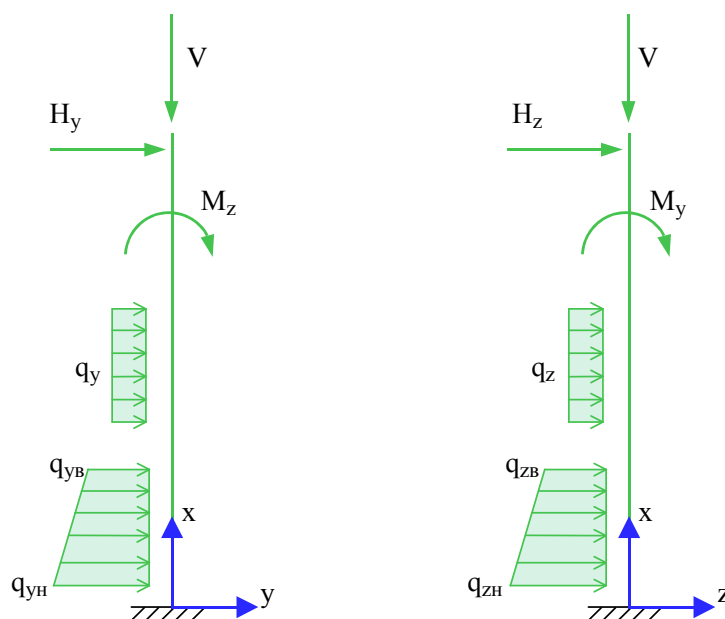


Рис. 3. Положительные направления нагрузок

Возможен ввод несочетаемых нагрузок. Такие нагрузки включаются в группу несочетаемых нагрузок. В комбинацию может войти только одна нагрузка из каждой группы. Нумерация групп начинается с единицы. Группы могут применяться, в частности, при учете ветровых нагрузок (при рассмотрении действия ветра по различным направлениям) и крановых нагрузок (при рассмотрении различных положений крана).

Возможен ввод знакопеременных нагрузок. В этом случае в расчете учитывается как заданная нагрузка, так и нагрузка противоположного знака.

Для сокращения вычислений и объема выходного документа программы предусмотрен выбор комбинаций нагрузок. При помощи статического расчета для всех возможных комбинаций нагрузок выбираются такие комбинации, для которых изгибающие моменты (или эксцентриситеты) принимают наибольшие значения.

Возможен ввод готовых расчетных комбинаций нагрузок. Задаваемая как вид нагрузки расчетная комбинация добавляется к множеству сгенерированных основных комбинаций нагрузок. В частности, возможен ввод лишь готовых комбинаций нагрузок.

#### 4. Расчет

Расчет колонны включает расчет усилий и расчет продольной арматуры, требуемой для обеспечения несущей способности нормальных сечений. При расчете усилий учитывается влияние вертикальных нагрузок на изгиб колонны. Приращения изгибающих моментов, обусловленные действием вертикальных нагрузок, зависят от прогибов. Если в одной из координатных плоскостей прогиб колонны стеснен или невозможен (например, из-за примыкания стены), то расчет в этой плоскости проводится без учета влияния прогиба.



#### 4.1 Расчет согласно СНиП и СНБ

В каждой координатной плоскости влияние прогиба на величину расчетного момента учитывается путем умножения изгибающего момента  $M$  на повышающий коэффициент  $\eta$ . Такой подход называется в [6] (стр.106) способом критических сил. Коэффициент  $\eta$  вычисляется по формуле:

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

где  $N$  - продольная сила,  $N_{cr}$  - критическая сила, которая определяется согласно [1], п.3.24, [2], п.6.2.16, [3], п.7.1.3.14. Формула для критической силы может быть записана в виде:

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

где  $D$  - жесткость колонны,  $l_0$  - расчетная длина колонны. При определении  $D$  по формулам, приведенным в нормах, приближенно учитываются неупругие свойства бетона, наличие трещин и ползучесть бетона при длительном действии нагрузки. Согласно [1], жесткость вычисляется по формуле:

$$D = \frac{6.4}{\pi^2} \left[ \frac{E_b I_b}{\varphi_l} \left( \frac{0.11}{0.1 + \delta_e} + 0.1 \right) + E_s I_s \right]$$

Здесь  $E_b, E_s$  - модули упругости бетона и стали;  $I_b, I_s$  - моменты инерции бетонного сечения и площади сечения арматуры относительно центральной оси сечения,  $\delta_e = e_0 / h$  - относительный эксцентриситет продольной силы ( $h$  - высота сечения в плоскости изгиба),  $\varphi_l = 1 + \beta \cdot M_{l1} / M_1$  - параметр, учитывающий длительное действие нагрузки ( $\beta = const$ ). Согласно [3], жесткость вычисляется аналогичным образом. В [2] формула для жесткости имеет вид:

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

Эксцентриситет  $e_0$  определяется относительно центра тяжести приведенного сечения (при несимметричном армировании центры тяжести бетонного и приведенного сечений не совпадают). При определении  $e_0$  учитывается случайный эксцентриситет  $e_a$  ([1], п.1.21, [2], п.4.2.6, [3], п.7.1.2.11). Согласно [1] и [2], при расчете колонны, являющейся элементом статически определимой конструкции, эксцентриситет  $e_0$  принимается равным  $\frac{M}{N} + e_a$ , а при расчете колонны, являющейся элементом статически неопределимой конструкции, - равным  $\frac{M}{N}$ , если  $\frac{M}{N} \geq e_a$ , и равным  $e_a$ , если  $\frac{M}{N} < e_a$ . Согласно [3], эксцентриситет  $e_0$  всегда принимается равным  $\frac{M}{N} + e_a$ .

Моменты  $M_1, M_{l1}$  вычисляются относительно оси тяжести наиболее растянутой (или наименее сжатой) арматуры по усилиям  $N, M$  от полной нагрузки и по усилиям  $N_l, M_l$  от длительно действующей части нагрузки. При расчете  $N_l, M_l$  согласно [1] и [2] в расчет ставятся постоянные и длительные нагрузки, входящие в рассматриваемую комбинацию, а также длительные части кратковременных нагрузок, вычисляемые по заданным при вводе

коэффициентам  $K_l$ . Согласно [3]  $N_l, M_l$  рассчитываются от практически постоянных комбинаций нагрузок. В расчете для готовой комбинации нагрузок принимается, что  $N_l = 0, M_l = 0$ .

Изгибная жесткость  $D$  как величина, зависящая от значений момента  $M$  через параметры  $\varphi_l$  и  $e_0$ , в общем случае изменяется по высоте колонны. Так как  $D$  вычисляется с учетом арматуры, размещенной в сечении, то значения расчетного момента  $\eta M$  также зависят от площади арматуры. Поэтому требуемая арматура может быть рассчитана только при помощи итераций. На текущем итерационном шаге для найденной площади арматуры вычисляются коэффициенты  $\eta_y$  и  $\eta_z$ , затем определяются расчетные моменты  $\eta_y M_y$  и  $\eta_z M_z$ , действующие в плоскостях  $Z$  и  $Y$ , а затем вычисляется требуемая площадь арматуры. Далее выполняется следующая итерация. Итерационный процесс оканчивается тогда, когда относительное приращение площади арматуры становится менее 0,1%.

Расчетная длина  $l_0$  в каждой координатной плоскости определяется по формуле  $l_0 = \pi [E_b I_b / (\eta_* N)]^{1/2}$ , где  $\eta_*$  – коэффициент критической нагрузки, равный отношению продольной силы при достижении критического состояния к действующей продольной силе. Коэффициент  $\eta_*$  отыскивается путем решения задачи об упругой устойчивости колонны при заданных краевых условиях и заданных вертикальных силах. Коэффициент  $\eta_*$  является системной характеристикой колонны. При действии распределенной вертикальной нагрузки или при действии сосредоточенной вертикальной нагрузки в промежуточных сечениях колонны расчетная длина является переменной величиной. В программе предусмотрена возможность ввода  $l_0$ . Расчетная длина может приниматься согласно рекомендациям норм ([1], п.3.25, [2], п.6.2.18, [3], п.7.1.3.8).

При расчете колонны согласно [1], требуемая арматура определяется в соответствии с п.3.28\*. Расчетное сопротивление бетона при сжатии принимается с коэффициентом условий работы бетона  $\gamma_b$ , который определяется как произведение отдельных коэффициентов  $\gamma_{bi}$  согласно таблице 15. При этом коэффициент  $\gamma_{b2}$ , зависящий от длительности действия нагрузки, определяется для каждой комбинации нагрузок по отдельности. Результирующий коэффициент условий работы с учетом коэффициента  $\gamma_{b2}$  не может быть менее 0,45.

При расчете колонны согласно [2] и [3] требуемая арматура определяется на основе нелинейной деформационной модели ([2], п.6.2.21; [3], п.7.1.1.2). При расчете по [2] применяется трехлинейная диаграмма состояния сжатого бетона. Расчет требуемой арматуры по [3] проводится при параболически-линейной диаграмме состояния сжатого бетона.

Предельные усилия выражаются через действующие усилия по формулам:

$$N_u = \gamma_u \cdot N, M_{yu} = \gamma_u \cdot M_y, M_{zu} = \gamma_u \cdot M_z$$

Прочность сечения обеспечена при  $\gamma_u \geq 1$ . Ошибки при расчете требуемой арматуры выводятся тогда, когда они превышают 1%. Появление информации об ошибках возможно, в частности, при расчете требуемой арматуры в произвольном полигональном сечении, если схема армирования задана некорректно.

Предусмотрен автоматический учет минимального коэффициента армирования, который принимается в зависимости от наибольшего значения гибкости колонны  $\lambda_{\max} = \max(\lambda_y, \lambda_z)$  согласно [1], п.5.16, [2], п.8.3.4, [3], п.11.2.2. Гибкость колонны в каждой координатной плоскости вычисляется по формуле  $\lambda = l_0 \sqrt{A_b / I_b}$ , в которой расчетная длина  $l_0$  определяется для случая приложения вертикальной силы на верхнем краю колонны.

Возможна проверка несущей способности колонны при заданной арматуре. Для проведения проверки надо ввести сечение колонны как произвольное полигональное с произвольной схемой армирования. Затем ввести арматурные слои и их площади, указав, что они являются постоянными. В этом случае, производится линейный расчет усилий по недеформированной схеме, и определяются расчетные моменты  $\eta M$  в каждой координатной плоскости, а затем проверяется несущая способность сечения. Если заданная площадь арматуры меньше требуемой, то выводится сообщение «Расчет требуемой арматуры невозможен».

Для колонны прямоугольного сечения предусмотрен расчет по прочности наклонных сечений с учетом действия продольной силы. Погонная площадь поперечной арматуры  $A_{sw}/s_w$  рассчитывается согласно [1], пп.3.31\*, 3.32, [2], п.6.2.34, [3], пп.7.2.1.1, 7.2.1.2, 7.2.1.5, 7.2.2.7 - 7.2.2.10. Кроме того, проводится проверка прочности на действие поперечной силы по наклонной полосе между наклонными трещинами. Если условие прочности по наклонной полосе не удовлетворяется, то выводится соответствующее сообщение. При расчете по [1] и [3] площадь арматуры, найденная из условия прочности по наклонной трещине, может быть увеличена для того, чтобы выполнялось условие прочности по наклонной полосе. Условие прочности при косом изгибе принимается согласно [7], п.3.39 в виде:

$$\left( \frac{Q_y}{Q_{b,y} + Q_{sw,y}} \right)^2 + \left( \frac{Q_z}{Q_{b,z} + Q_{sw,z}} \right)^2 \leq 1$$

## 4.2 Расчет согласно Eurocode 2

В каждой координатной плоскости расчетный момент по теории II порядка определяется по формуле (5.30):

$$M_{Ed} = \frac{M_{0Ed}}{1 - N_{Ed} / N_B}$$

где  $M_{0Ed}$  - расчетный момент, определенный по теории I порядка,  $N_{Ed}$  - расчетная продольная сила,  $N_B$  - критическая сила, которая определяется на основе номинальной жесткости. Формула для критической силы может быть записана в виде:

$$N_B = \frac{\pi^2 D}{l_0^2}$$

где  $D$  - номинальная жесткость колонны,  $l_0$  - расчетная длина. Значение  $D$  вычисляется по формуле (5.21):

$$D = K_c E_{cd} I_c + K_s E_s I_s$$

Здесь  $E_{cd} = E_{cm} / \gamma_{cE}$  - расчетное значение модуля упругости бетона,  $\gamma_{cE} = 1.2$ ,  $E_s$  - модуль упругости стали;  $I_c, I_s$  - моменты инерции бетонного сечения и площади сечения арматуры относительно центральной оси сечения. Коэффициенты  $K_c, K_s$  определяются по формулам:

$$K_c = k_1 k_2 / (1 + \varphi_{ef})$$

$$K_s = 1$$

$$k_1 = \sqrt{f_{ck} / 20}$$

$$k_2 = n \frac{\lambda}{170} \leq 0.20$$

$$n = N_{Ed} / (A_c f_{cd})$$

Здесь  $f_{ck}$  - характеристическое значение прочности бетона при сжатии в Н/мм<sup>2</sup>,  $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c$  - расчетное значение прочности бетона,  $A_c$  - площадь сечения,  $\lambda = l_0 / i$  - гибкость,  $i$  - радиус инерции сечения. Коэффициент безопасности для бетона  $\gamma_c$  принимается равным 1.5 при расчете для основной комбинации воздействий и равным 1.2 при расчете для особой комбинации воздействий. Эффективный коэффициент ползучести  $\varphi_{ef}$  принимается равным предельному значению коэффициента ползучести  $\varphi(\infty, t_0)$ . Значение  $\varphi(\infty, t_0)$  определяется согласно [8], Приложение В по значению  $RH$  относительной влажности воздуха окружающей среды и значению  $t_0$  возраста бетона к моменту нагружения.

Предусмотрен автоматический учет минимальной площади арматуры, определяемой по формуле (9.12N):

$$A_{s,min} = \frac{0.10 N_{Ed}}{f_{yd}}$$

где  $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$  - расчетное значение предела текучести стали. Коэффициент безопасности для арматуры  $\gamma_s$  принимается равным 1.15 при расчете для основной комбинации воздействий и равным 1.0 при расчете для особой комбинации воздействий.

## 5. Конструирование

Конструирование продольной арматуры в колонне производится с учетом нормативных требований по защитному слою бетона, за исключением случая полигонального сечения с произвольной схемой армирования. Для учета этих требований расчет колонны проводится дважды. Необходимые для расчета расстояния от центров тяжести площадей арматуры до контура сечения первоначально определяются по заданному наибольшему диаметру стержней с учетом диаметра хомута и заданных минимальных толщин защитного слоя бетона для продольной и поперечной арматуры. По результатам первого расчета колонны производится конструирование арматуры, и корректируются расстояния от центров тяжести площадей арматуры до контура сечения. Затем проводится повторный расчет колонны и конструирование арматуры. Расстояния от центров тяжести площадей арматуры до контура сечения, для которых при повторном расчете определена требуемая арматура, указываются в выходном документе программы.

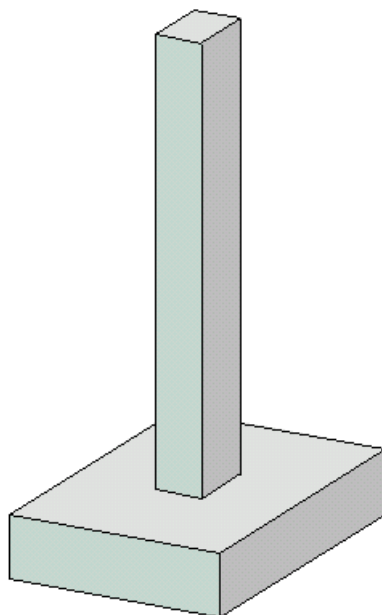
При подборе арматурных стержней применяется следующий общий ряд диаметров (в мм): 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 32, 36, 40. Арматурные стержни размещаются в сечении с учетом номинальной толщины защитного слоя бетона и номинального расстояния в свету между стержнями. При определении номинальной толщины защитного слоя бетона учитываются заданные минимальные толщины защитного слоя бетона для продольной и поперечной арматуры, диаметр подобранных стержней и диаметр хомута. При этом толщина защитного слоя бетона для хомута принимается кратной 5 мм. В сечении со схемой армирования  $A = 0$  в каждом углу может размещаться один арматурный стержень или (при необходимости) более (3 или 5 арматурных стержней). При расчете требуемой арматуры применяется расстояние от контура сечения до общего центра тяжести группы стержней.

При подборе арматурных стержней учитываются заданные минимальный и максимальный диаметры стержней, максимальное количество стержней в сечении, минимальное расстояние в свету между стержнями. Эти параметры позволяют управлять подбором арматуры. По результатам конструирования осуществляется графический вывод сечения с подобранными арматурными стержнями.

## Литература

1. СНиП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 80 с.
2. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры / ГУП «НИИЖБ», ФГУП ЦПП. – М., 2004.
3. СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2003. – 139 с.
4. Бетонные и железобетонные конструкции (Изменение №1 СНБ 5.03.01-02)/ Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2004.
5. СНиП 2.01.07-85\*. Нагрузки и воздействия / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1987. – 36 с.
6. Расчет железобетонных конструкций по прочности, трещиностойкости и деформациям / А.С.Залесов, Э.Н.Кодыш, Л.Л.Лемыш, И.К.Никитин. – М.: Стройиздат, 1988.-320 с.
7. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелых и легких бетонов без предварительного напряжения арматуры (к СНиП 2.03.01-84)/ЦНИИпромзданий Госстроя СССР, НИИЖБ Госстроя СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 192 с.
8. ТКП EN 1992-1-1: Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций – Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий.
9. СТБ EN 1990-2007: Еврокод. Основы проектирования несущих конструкций.
10. СП 20.13330.2011: Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\*. – Минрегион России, 2010.

## 415 – Колонна (сейсмика, пульсации ветра)



Программа предназначена для проектирования статически неопределимой одноярусной железобетонной колонны произвольного сечения согласно следующим нормам: СНиП 2.03.01-84\* [1], СП 52-101-2003 [2], СНБ 5.03.01-02 [3], [4] и Eurocode 2 [8]. При расчете по [2] нагрузки могут задаваться и комбинироваться согласно СНиП 2.01.07-85\* [5] или СП 20.13330.2011 [10]. Программа ориентирована на расчет колонны с учетом сейсмических воздействий и пульсаций ветра. Рассчитывается требуемая площадь продольной арматуры и производится конструирование арматуры с учетом требований по толщине защитного слоя бетона. Осуществляется графический вывод сечения с подобранными арматурными стержнями.

## 1. Расчетная схема

Расчетная схема колонны представляет собой стержневой элемент произвольного сечения, имеющий упругие или абсолютно жесткие закрепления на одном или обоих краях. Условия закрепления формулируются для горизонтального перемещения и поворота сечения вокруг горизонтальной оси. При расчете колонны применяется система координат  $x, y$ , начало которой совпадает с центром тяжести нижнего сечения колонны. Ось  $x$  направлена снизу вверх.

## 2. Сечение

Сечение может задаваться как стандартное сечение (прямоугольное, круговое или кольцевое сечение) или как произвольное полигональное сечение (рис.1). Для прямоугольного сечения возможны следующие схемы армирования  $A$  (рис.2): схема с равными площадями арматуры вблизи вершин сечения ( $A = 0$ ), схема с равномерным распределением площади арматуры вдоль контура сечения ( $A = 1$ ), схема с равными площадями арматуры вблизи верхней и нижней сторон сечения ( $A = 2$ ), схема с равными площадями арматуры вблизи левой и правой сторон сечения ( $A = 3$ ). Для кругового и кольцевого сечений рассматривается схема армирования с равномерным распределением площади арматуры вдоль контура сечения.

Задание произвольного полигонального сечения осуществляется путем ввода координат его вершин. Возможен ввод до 50 вершин. Выбор координатных осей может быть произвольным. Вершины задаются в последовательности, которая соответствует обходу полигона по контуру в определенном направлении. При этом полигональная область должна оставаться по одну сторону (например, слева) от направления обхода. При наличии внутренних полостей в сечении требуется произвести разрезы, позволяющие обойти граничные контуры (внешний и внутренние) так, чтобы область оставалась по одну сторону от направления обхода.

Для полигонального сечения возможны следующие схемы армирования: схема с равными площадями арматуры вблизи вершин внешнего контура сечения ( $A = 0$ ), схема с равномерным распределением площади арматуры вдоль внешнего контура сечения ( $A = 1$ ), произвольная схема армирования. Для схем  $A = 0$  и  $A = 1$  необходимые для расчета координаты арматуры определяются автоматически. При  $A = 0$  исключаются из рассмотрения входящие углы (т.е. углы, большие 180 град). Кроме того, проверяется возможность корректного размещения арматурных стержней при наличии близких вершин.

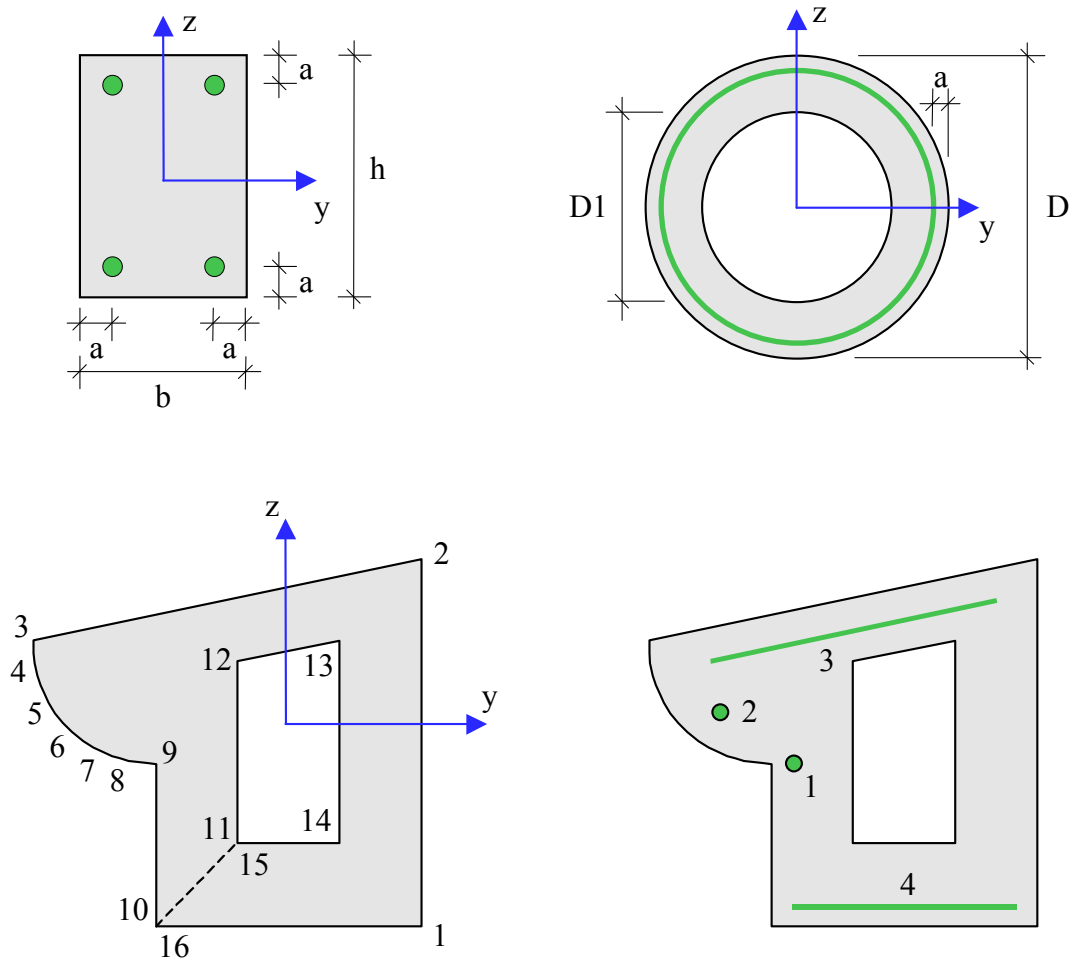


Рис. 1. Сечения

При выборе произвольной схемы армирования требуется задать отрезки (арматурные слои), на которых размещается арматура. Возможен ввод до 50 арматурных слоев. Слои могут иметь произвольную длину и ориентацию. Предполагается, что площадь арматуры равномерно распределена по слою. Если длина слоя равна нулю, то такой слой соответствует «сосредоточенной» площади арматуры. Арматурные слои подразделяются на слои с варьируемой площадью и слои с постоянной площадью (не изменяемой при расчете требуемой арматуры). Для каждого арматурного слоя с варьируемой площадью определяется его доля от общей площади арматуры (при этом слои с постоянной площадью не учитываются). Доля слоя рассчитывается по заданным относительным площадям как  $k_i = A_i / (A_1 + A_2 + \dots)$ , где  $i = 1, 2, \dots$ ;  $A_1, A_2, \dots$  – относительные площади арматурных слоев с варьируемой площадью. Площадь  $i$ -го слоя определяется по формуле  $A_{si} = k_i \cdot A_{s,tot}$ , где  $A_{s,tot}$  – общая площадь арматуры (без учета постоянной площади). При помощи расчета отыскивается общая площадь арматуры  $A_{s,tot}$ , а затем по коэффициентам  $k_i$  вычисляются площади арматурных слоев  $A_{si}$ .



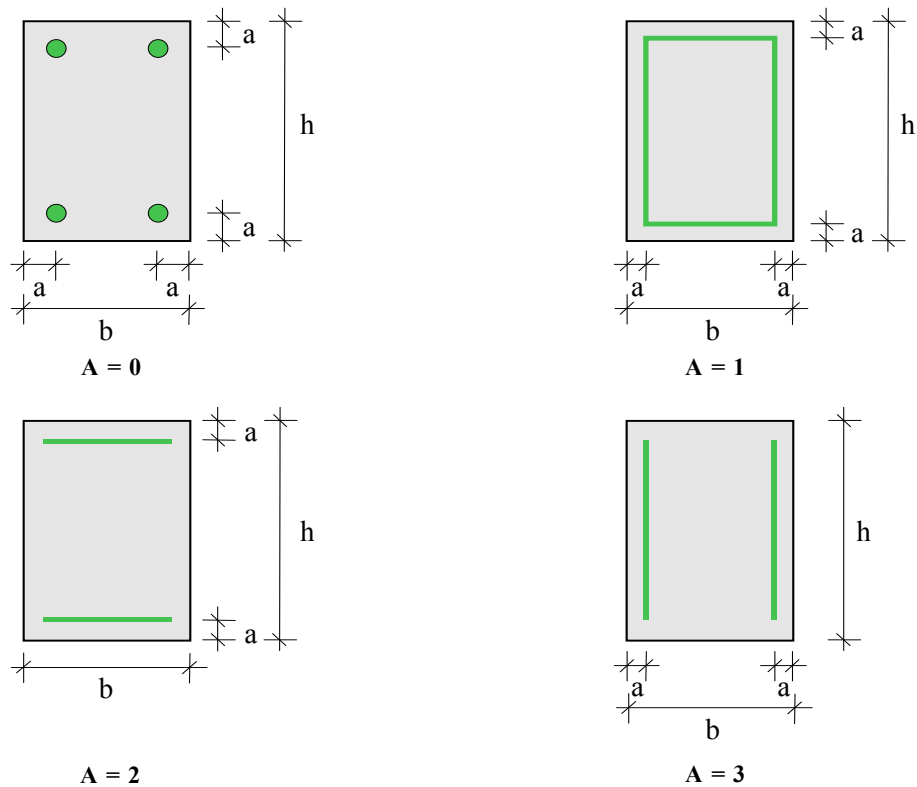


Рис. 2. Схемы армирования прямоугольного сечения

### 3. Нагрузки

Возможны следующие нагрузки: сосредоточенные вертикальные и горизонтальные силы, сосредоточенные моменты, распределенные горизонтальные и вертикальные нагрузки, смещения и повороты жестких опор. Возможен автоматический учет собственного веса колонны. Положительные направления нагрузок показаны на рис.3. Положительные направления смещений жестких опор совпадают с направлениями координатных осей. Положительные направления поворотов жестких опор совпадают с положительными направлениями моментов.

При расчете по [1] классификация и комбинирование нагрузок принимаются согласно СНиП 2.01.07-85\* «Нагрузки и воздействия» [5]. При расчете по [2] предусмотрено применение СНиП [5] или СП [10]. Комбинирование нагрузок представляет собой генерацию множества возможных комбинаций нагрузок с учетом коэффициентов надежности по нагрузке  $\gamma_f$  и коэффициентов, связанных с одновременным учетом двух и более временных нагрузок.

При расчете по [3] классификация и комбинирование нагрузок принимаются согласно Приложению А. Частные коэффициенты безопасности  $\gamma_F$  для нагрузок принимаются по таблице А.2. Комбинационные коэффициенты  $\psi_0, \psi_1, \psi_2$  для переменных нагрузок принимаются по таблице А.1. Предусмотрен ввод нестандартных значений  $\gamma_F, \psi_0, \psi_1, \psi_2$  для отдельных нагрузок. Комбинирование нагрузок представляет собой генерацию множества комбинаций нагрузок с учетом благоприятного и неблагоприятного эффекта от нагрузок, а также возможности доминирования каждой из переменных нагрузок.

Аналогичное комбинирование нагрузок (воздействий) производится при расчете по Eurocode 2. При этом классификация воздействий принимается согласно [9], Приложение А.1. Комбинации, в которые входит сейсмическое воздействие, строятся согласно [9], 6.4.3.4 по правилу:

$$\sum_j G_{k,j} + A_{Ed} + \sum_i \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

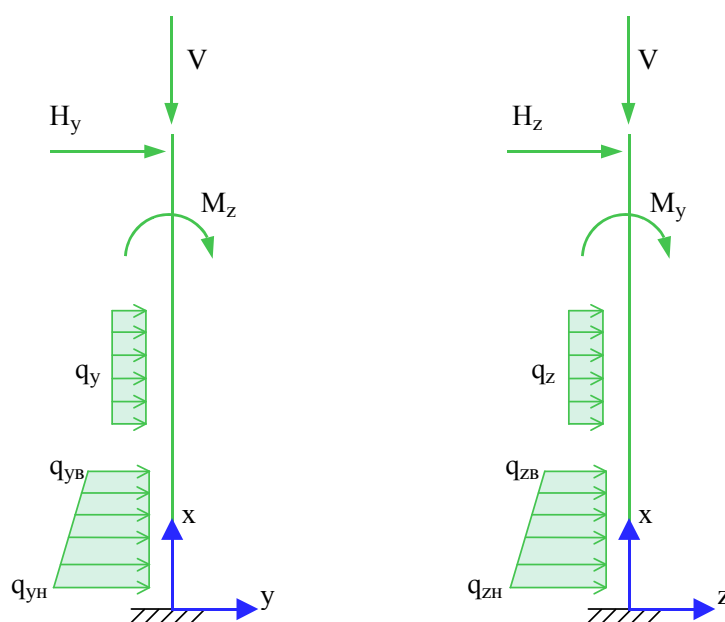


Рис. 3. Положительные направления нагрузок

Возможен ввод несочетаемых нагрузок. Такие нагрузки включаются в группу несочетаемых нагрузок. В комбинацию может войти только одна нагрузка из каждой группы. Нумерация групп начинается с единицы. Группы могут применяться, в частности, при учете ветровых нагрузок (при рассмотрении действия ветра по различным направлениям).

Возможен ввод знакопеременных нагрузок. В этом случае, в расчете учитывается как заданная нагрузка, так и нагрузка противоположного знака.

Возможен ввод готовых расчетных комбинаций нагрузок. Задаваемая как вид нагрузки расчетная комбинация добавляется к множеству сгенерированных основных комбинаций нагрузок. В частности, возможен ввод лишь готовых комбинаций нагрузок.

При задании нагружения колонны от действия ветра сначала вводятся нагрузки, обусловленные средней составляющей ветрового давления, а затем – нагрузки, соответствующие разложению пульсационной составляющей по формам колебаний конструкции и определенные при помощи динамического расчета.

#### 4. Расчет

Расчет колонны включает расчет усилий и расчет продольной арматуры, требуемой для обеспечения несущей способности нормальных сечений. На первом этапе расчета определяются распределения усилий в колонне от отдельных нагрузок. Затем из множества комбинаций нагрузок выбираются такие комбинации, для которых усилия или эксцентриситеты принимают наибольшие значения. В выходном документе программы приводятся результаты расчета для той из выбранных комбинаций нагрузок, для которой требуемая площадь арматуры принимает наибольшее значение.

Усилия в сечениях колонны, обусловленные пульсациями ветра, вычисляются по формуле вида:

$$N_p = \sqrt{\sum_{i=1}^n N_i^2}$$

где  $N_i$  - усилия, соответствующие  $i$ -й форме колебаний конструкции,  $n$  – число учитываемых форм колебаний. Вычисленное значение  $N_p$  принимается с тем знаком (+, -), который имеет наибольшее по модулю значение  $N_i$ . Ветровое нагружение представляется в виде совокупности двух нагружений, для одного из которых усилия принимаются равными  $N + N_p$ , а для другого – равными  $N - N_p$ , где  $N$  – усилие от средней составляющей ветрового давления.

Усилия от сейсмического воздействия согласно [6] вычисляются аналогичным образом по нагрузкам, соответствующим формам колебаний. Сейсмическая нагрузка всегда принимается знакопеременной.

При определении расчетных изгибающих моментов учитывается влияние прогибов. Если в одной из координатных плоскостей прогиб колонны стеснен или невозможен (например, из-за примыкания стены), то расчет в этой плоскости проводится без учета влияния прогиба.

#### 4.1 Расчет согласно СНиП и СНБ

В каждой координатной плоскости влияние прогиба на величину расчетного момента учитывается путем умножения изгибающего момента  $M$  на повышающий коэффициент  $\eta$ , который вычисляется по формуле:

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

где  $N$  - продольная сила,  $N_{cr}$  - критическая сила, которая определяется согласно [1], п.3.24, [2], п.6.2.16, [3], п.7.1.3.14. Формула для критической силы может быть записана в виде:

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

где  $D$  - жесткость колонны,  $l_0$  - расчетная длина колонны. При определении  $D$  по формулам, приведенным в нормах, приближенно учитываются неупругие свойства бетона, наличие трещин и ползучесть бетона при длительном действии нагрузки. Согласно [1], жесткость вычисляется по формуле:

$$D = \frac{6.4}{\pi^2} \left[ \frac{E_b I_b}{\varphi_l} \left( \frac{0.11}{0.1 + \delta_e} + 0.1 \right) + E_s I_s \right]$$

Здесь  $E_b, E_s$  - модули упругости бетона и стали;  $I_b, I_s$  - моменты инерции бетонного сечения и площади сечения арматуры относительно центральной оси сечения,  $\delta_e = e_0 / h$  - относительный эксцентриситет продольной силы ( $h$  - высота сечения в плоскости изгиба),  $\varphi_l = 1 + \beta \cdot M_{l1} / M_1$  - параметр, учитывающий длительное действие нагрузки ( $\beta = const$ ). Согласно [3], жесткость вычисляется аналогичным образом. В [2] формула для жесткости имеет вид:

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

Эксцентриситет  $e_0$  определяется относительно центра тяжести приведенного сечения (при несимметричном армировании центры тяжести бетонного и приведенного сечений не совпадают). При определении  $e_0$  учитывается случайный эксцентриситет  $e_a$  ([1], п.1.21, [2], п.4.2.6, [3], п.7.1.2.11). Согласно [1] и [2] при расчете колонны, являющейся элементом

статически определимой конструкции, эксцентриситет  $e_0$  принимается равным  $\frac{M}{N} + e_a$ , а при расчете колонны, являющейся элементом статически неопределимой конструкции, – равным  $\frac{M}{N}$ , если  $\frac{M}{N} \geq e_a$ , и равным  $e_a$ , если  $\frac{M}{N} < e_a$ . Согласно [3] эксцентриситет  $e_0$  всегда принимается равным  $\frac{M}{N} + e_a$ .

Моменты  $M_1, M_{1l}$  вычисляются относительно оси тяжести наиболее растянутой (или наименее сжатой) арматуры по усилиям  $N, M$  от полной нагрузки и по усилиям  $N_l, M_l$  от длительно действующей части нагрузки. При расчете  $N_l, M_l$  согласно [1] и [2] в расчет ставятся постоянные и длительные нагрузки, входящие в рассматриваемую комбинацию, а также длительные части кратковременных нагрузок, вычисляемые по заданным при вводе коэффициентам  $K_l$ . Согласно [3]  $N_l, M_l$  рассчитываются от практически постоянных комбинаций нагрузок. В расчете для готовой комбинации нагрузок принимается, что  $N_l = 0, M_l = 0$ .

Изгибная жесткость  $D$  как величина, зависящая от значений момента  $M$  через параметры  $\varphi_l$  и  $e_0$ , в общем случае изменяется по высоте колонны. Так как  $D$  вычисляется с учетом арматуры, размещенной в сечении, то значения расчетного момента  $\eta M$  также зависят от площади арматуры. Поэтому требуемая арматура может быть рассчитана только при помощи итераций. На текущем итерационном шаге для найденной площади арматуры вычисляются коэффициенты  $\eta_y$  и  $\eta_z$ , затем определяются расчетные моменты  $\eta_y M_y$  и  $\eta_z M_z$ , действующие в плоскостях  $Z$  и  $Y$ , а затем вычисляется требуемая площадь арматуры. Далее выполняется следующая итерация. Итерационный процесс оканчивается тогда, когда относительное приращение площади арматуры становится менее 0,1%.

При расчете колонны согласно [1], требуемая арматура определяется в соответствии с п.3.28\*. Расчетное сопротивление бетона при сжатии принимается с коэффициентом условий работы бетона  $\gamma_b$ , который определяется как произведение отдельных коэффициентов  $\gamma_{bi}$  согласно таблице 15. При этом коэффициент  $\gamma_{b2}$ , зависящий от длительности действия нагрузки, определяется для каждой комбинации нагрузок по отдельности. Результирующий коэффициент условий работы с учетом коэффициента  $\gamma_{b2}$  не может быть менее 0,45.

При расчете колонны согласно [2] и [3], требуемая арматура определяется на основе нелинейной деформационной модели ([2], п.6.2.21; [3], п.7.1.1.2). При расчете по [2] применяется трехлинейная диаграмма состояния сжатого бетона. Расчет требуемой арматуры по [3] проводится при параболически-линейной диаграмме состояния сжатого бетона.

Предельные усилия выражаются через действующие усилия по формулам:

$$N_u = \gamma_u \cdot N, M_{yu} = \gamma_u \cdot M_y, M_{zu} = \gamma_u \cdot M_z$$

Прочность сечения обеспечена при  $\gamma_u \geq 1$ .

Предусмотрен автоматический учет минимального коэффициента армирования, который принимается в зависимости от наибольшего значения гибкости колонны  $\lambda_{\max} = \max(\lambda_y, \lambda_z)$  согласно [1], п.5.16, [2], п.8.3.4, [3], п.11.2.2. Гибкость колонны в каждой координатной плоскости вычисляется по формуле  $\lambda = l_0 \sqrt{A_b / I_b}$ , в которой расчетная длина  $l_0$  определяется для случая приложения вертикальной силы на верхнем краю колонны.

Возможна проверка несущей способности колонны при заданной арматуре. Для проведения проверки надо ввести сечение колонны как произвольное полигональное с произвольной

схемой армирования. Затем ввести арматурные слои и их площади, указав, что они являются постоянными. В этом случае производится линейный расчет усилий по недеформированной схеме, и определяются расчетные моменты  $\eta M$  в каждой координатной плоскости, а затем проверяется несущая способность сечения. Если заданная площадь арматуры меньше требуемой, то выводится сообщение «Расчет требуемой арматуры невозможен».

Для колонны прямоугольного сечения предусмотрен расчет по прочности наклонных сечений с учетом действия продольной силы. Погонная площадь поперечной арматуры  $A_{sw}/s_w$  рассчитывается согласно [1], пп.3.31\*, 3.32, [2], п.6.2.34, [3], пп.7.2.1.1, 7.2.1.2, 7.2.1.5, 7.2.2.7 - 7.2.2.10. Кроме того, проводится проверка прочности на действие поперечной силы по наклонной полосе между наклонными трещинами. Если условие прочности по наклонной полосе не удовлетворяется, то выводится соответствующее сообщение. При расчете по [1] и [3] площадь арматуры, найденная из условия прочности по наклонной трещине, может быть увеличена для того, чтобы выполнялось условие прочности по наклонной полосе. Условие прочности при косом изгибе принимается согласно [7], п.3.39 в виде:

$$\left( \frac{Q_y}{Q_{b,y} + Q_{sw,y}} \right)^2 + \left( \frac{Q_z}{Q_{b,z} + Q_{sw,z}} \right)^2 \leq 1$$

## 4.2 Расчет согласно Eurocode 2

В каждой координатной плоскости расчетный момент по теории II порядка определяется по формуле (5.30):

$$M_{Ed} = \frac{M_{0Ed}}{1 - N_{Ed} / N_B}$$

где  $M_{0Ed}$  - расчетный момент, определенный по теории I порядка,  $N_{Ed}$  - расчетная продольная сила,  $N_B$  - критическая сила, которая определяется на основе номинальной жесткости. Формула для критической силы может быть записана в виде:

$$N_B = \frac{\pi^2 D}{l_0^2}$$

где  $D$  - номинальная жесткость колонны,  $l_0$  - расчетная длина. Значение  $D$  вычисляется по формуле (5.21):

$$D = K_c E_{cd} I_c + K_s E_s I_s$$

Здесь  $E_{cd} = E_{cm} / \gamma_{cE}$  - расчетное значение модуля упругости бетона,  $\gamma_{cE} = 1.2$ ,  $E_s$  - модуль упругости стали;  $I_c, I_s$  - моменты инерции бетонного сечения и площади сечения арматуры относительно центральной оси сечения. Коэффициенты  $K_c, K_s$  определяются по формулам:

$$K_c = k_1 k_2 / (1 + \varphi_{ef})$$

$$K_s = 1$$

$$k_1 = \sqrt{f_{ck} / 20}$$

$$k_2 = n \frac{\lambda}{170} \leq 0.20$$

$$n = N_{Ed} / (A_c f_{cd})$$

Здесь  $f_{ck}$  - характеристическое значение прочности бетона при сжатии в Н/мм<sup>2</sup>,  $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c$  - расчетное значение прочности бетона,  $A_c$  - площадь сечения,  $\lambda = l_0 / i$  - гибкость,  $i$  - радиус инерции сечения. Коэффициент безопасности для бетона  $\gamma_c$  принимается равным 1.5 при расчете для основной комбинации воздействий и равным 1.2 при расчете для особой комбинации воздействий. Эффективный коэффициент ползучести  $\varphi_{ef}$  принимается равным предельному значению коэффициента ползучести  $\varphi(\infty, t_0)$ . Значение  $\varphi(\infty, t_0)$  определяется согласно [8], Приложение В по значению  $RH$  относительной влажности воздуха окружающей среды и значению  $t_0$  возраста бетона к моменту нагружения.

Предусмотрен автоматический учет минимальной площади арматуры, определяемой по формуле (9.12N):

$$A_{s,\min} = \frac{0.10N_{Ed}}{f_{yd}}$$

где  $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$  - расчетное значение предела текучести стали. Коэффициент безопасности для арматуры  $\gamma_s$  принимается равным 1.15 при расчете для основной комбинации воздействий и равным 1.0 при расчете для особой комбинации воздействий.

## 5. Конструирование

Конструирование продольной арматуры в колонне производится с учетом нормативных требований по защитному слою бетона, за исключением случая полигонального сечения с произвольной схемой армирования. Для учета этих требований расчет колонны проводится дважды. Необходимые для расчета расстояния от центров тяжести площадей арматуры до контура сечения первоначально определяются по заданному наибольшему диаметру стержней с учетом диаметра хомута и заданных минимальных толщин защитного слоя бетона для продольной и поперечной арматуры. По результатам первого расчета колонны производится конструирование арматуры, и корректируются расстояния от центров тяжести площадей арматуры до контура сечения. Затем проводится повторный расчет колонны и конструирование арматуры. Расстояния от центров тяжести площадей арматуры до контура сечения, для которых при повторном расчете определена требуемая арматура, указываются в выходном документе программы.

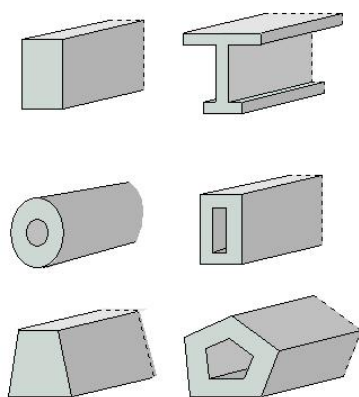
При подборе арматурных стержней применяется следующий общий ряд диаметров (в мм): 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 32, 36, 40. Арматурные стержни размещаются в сечении с учетом номинальной толщины защитного слоя бетона и номинального расстояния в свету между стержнями. При определении номинальной толщины защитного слоя бетона учитываются заданные минимальные толщины защитного слоя бетона для продольной и поперечной арматуры, диаметр подобранных стержней и диаметр хомута. При этом толщина защитного слоя бетона для хомута принимается кратной 5 мм. В сечении со схемой армирования  $A = 0$  в каждом углу может размещаться один арматурный стержень или (при необходимости) более (3 или 5 арматурных стержней). При расчете требуемой арматуры применяется расстояние от контура сечения до общего центра тяжести группы стержней.

При подборе арматурных стержней учитываются заданные минимальный и максимальный диаметры стержней, максимальное количество стержней в сечении, минимальное расстояние в свету между стержнями. Эти параметры позволяют управлять подбором арматуры. По результатам конструирования осуществляется графический вывод сечения с подобранными арматурными стержнями.

## Литература

1. СНиП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 80 с.
2. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры / ГУП «НИИЖБ», ФГУП ЦПП. – М., 2004.
3. СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2003. – 139 с.
4. Бетонные и железобетонные конструкции (Изменение №1 СНБ 5.03.01-02)/ Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2004.
5. СНиП 2.01.07-85\*. Нагрузки и воздействия / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1987. – 36 с.
6. СНиП II-7-81\*. Строительство в сейсмических районах/Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2000. – 44 с.
7. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелых и легких бетонов без предварительного напряжения арматуры (к СНиП 2.03.01-84)/ЦНИИпромзданий Госстроя СССР, НИИЖБ Госстроя СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 192 с.
8. ТКП EN 1992-1-1: Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций – Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий.
9. СТБ EN 1990-2007: Еврокод. Основы проектирования несущих конструкций.
10. СП 20.13330.2011: Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\*. – Минрегион России, 2010.

## 433 – Подбор продольной арматуры (Еврокод 2)





Программа предназначена для расчёта требуемой продольной арматуры и конструирования арматуры в сечении, а также для проверки несущей способности сечения согласно ТКП EN 1992-1-1 [1]. По результатам конструирования осуществляется графический вывод сечения с подобранными арматурными стержнями. Допускается задание бетона и/или арматурной стали с ненормированной прочностью.

## 1. Сечение

Сечения подразделяются на стандартные и произвольные. К стандартным сечениям относятся: прямоугольное сечение, пологое прямоугольное сечение, круговое или кольцевое сечение, тавровое или двутавровое сечение, трапециевидное сечение (рис.1).

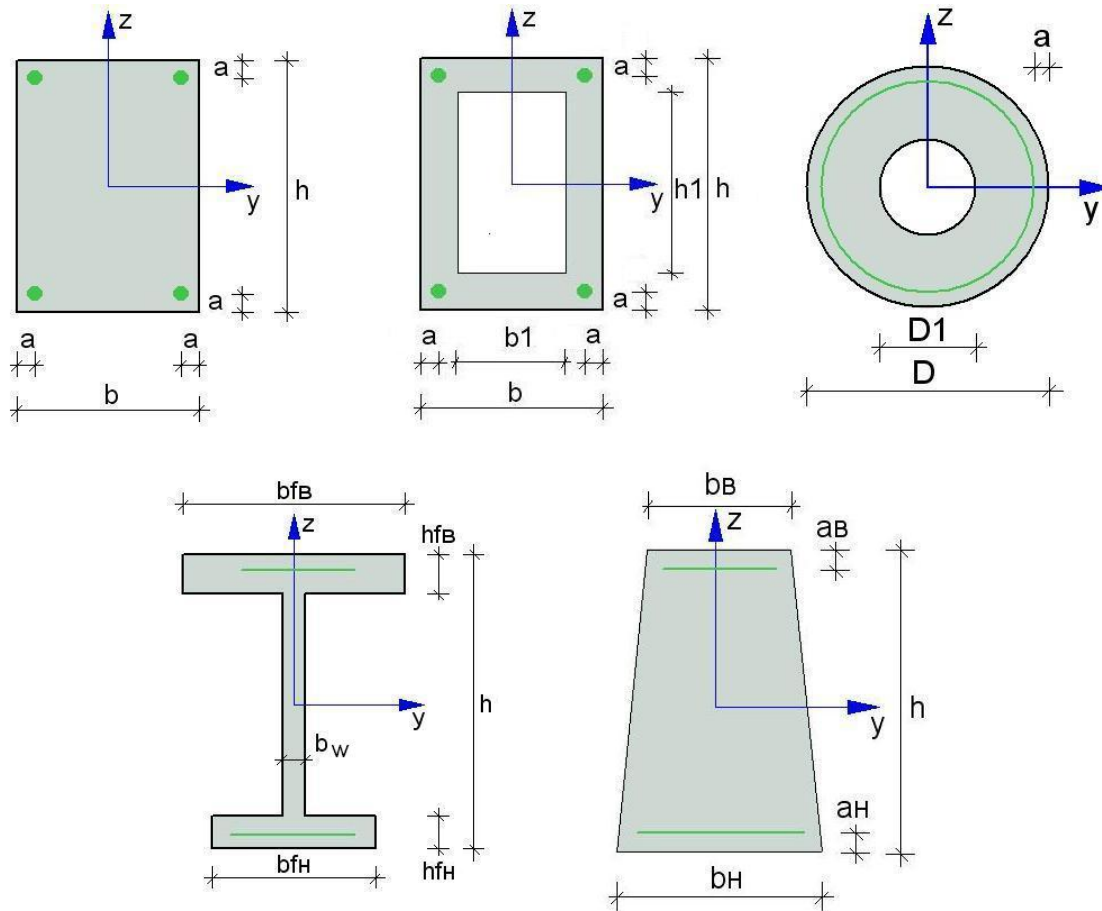


Рис. 1. Стандартные сечения

Для прямоугольного сечения рассматриваются следующие схемы армирования  $A$  (рис.2): схема с равными площадями арматуры вблизи вершин сечения ( $A = 0$ ), схема с равномерным распределением площади арматуры вдоль контура сечения ( $A = 1$ ), схемы с равными ( $A = 2$ ) и с различными ( $A = 3$ ) площадями арматуры вблизи верхней и нижней сторон сечения. Для пологое прямоугольного сечения рассматриваются схемы  $A = 0$ ,  $A = 1$ ,  $A = 2$ . Для таврового (двутаврового) сечения и трапециевидного сечения рассматривается схема  $A = 3$ . Для кругового (кольцевого) сечения рассматривается схема армирования с равномерным распределением площади арматуры вдоль контура сечения.

Для сечения со схемой армирования  $A = 3$  предусмотрены два вида распределения общей площади арматуры по арматурным слоям: свободное распределение и заданное распределение. При свободном распределении, площади арматурных слоев не связаны никаким условием и определяются независимо друг от друга. При заданном распределении, для каждого арматурного слоя определяется его доля от общей площади арматуры. Доля слоя

рассчитывается по заданным относительным площадям как  $k_i = A_i / (A_1 + A_2)$ , где  $i = 1, 2$ ;  $A_1, A_2$  – относительные площади нижнего и верхнего арматурных слоев. Площадь  $i$ -го слоя определяется по формуле  $A_{si} = k_i A_{s,tot}$ , где  $A_{s,tot}$  – общая площадь арматуры.

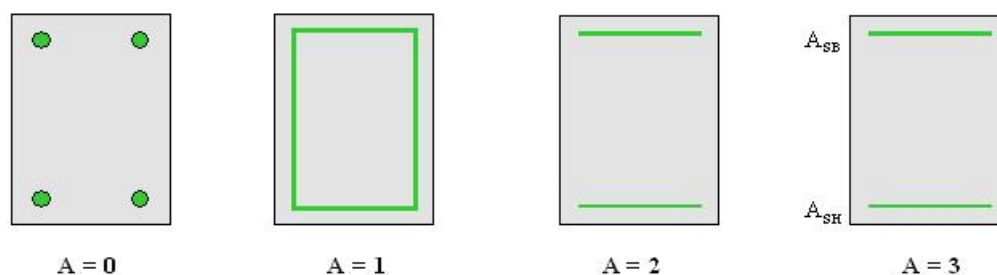


Рис. 2. Схемы армирования прямоугольного сечения

Задание произвольного полигонального сечения осуществляется путем ввода координат его вершин (рис.3). Возможен ввод до 50 вершин. Выбор координатных осей декартовой системы может быть произвольным. Вершины задаются в последовательности, которая соответствует обходу полигона по контуру в определенном направлении. При этом полигональная область должна оставаться по одну сторону (например, слева) от направления обхода. При наличии внутренних полостей в сечении требуется произвести разрезы, позволяющие обойти граничные контуры (внешний и внутренние) так, чтобы область оставалась по одну сторону от направления обхода. Предусмотрен автоматический учет полости прямоугольной формы.

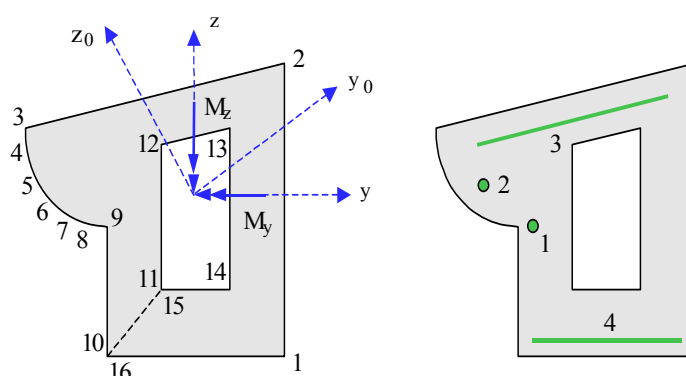


Рис. 3. Произвольное полигональное сечение

Для полигонального сечения возможны следующие схемы армирования: схема с равными площадями арматуры вблизи вершин внешнего контура сечения ( $A = 0$ ), схема с равномерным распределением площади арматуры вдоль внешнего контура сечения ( $A = 1$ ), произвольная схема армирования. Для схем  $A = 0$  и  $A = 1$  необходимые для расчета координаты арматуры определяются автоматически. При  $A = 0$  исключаются из рассмотрения входящие углы (т.е. углы, большие  $180^\circ$ ). Кроме того, проверяется возможность корректного размещения арматурных стержней при наличии близких вершин.

При выборе произвольной схемы армирования требуется задать отрезки (арматурные слои), на которых размещается арматура. Возможен ввод до 50 арматурных слоев. Слои могут иметь произвольную длину и ориентацию. Предполагается, что площадь арматуры равномерно распределена по слою. Если длина слоя равна нулю, то такой слой соответствует «сосредоточенной» площади арматуры. Арматурные слои подразделяются на слои с варьируемой площадью и слои с постоянной площадью (неизменяемой при расчете требуемой

арматуры). Предусмотрены два вида распределения площади арматуры по арматурным слоям с варьируемой площадью: свободное распределение и заданное распределение.

При свободном распределении арматуры, площади различных арматурных слоев могут быть одинаковыми или различными. Арматурные слои с одинаковой площадью образуют одну группу. Группа может состоять из одного слоя. Нумерация групп начинается с единицы. Если для некоторого арматурного слоя группа не указана, то автоматически образуется отдельная группа, состоящая из одного этого слоя. Площади арматуры, соответствующие различным группам, не связаны никаким условием и определяются независимо друг от друга.

При заданном распределении арматуры, для каждого арматурного слоя с варьируемой площадью определяется его доля от общей площади арматуры (при этом слои с постоянной площадью не учитываются). Доля слоя рассчитывается по заданным относительным площадям как  $k_i = A_i / (A_1 + A_2 + \dots)$ , где  $i = 1, 2, \dots$ ;  $A_1, A_2, \dots$  – относительные площади арматурных слоев с варьируемой площадью. Площадь  $i$ -го слоя определяется по формуле  $A_{si} = k_i A_{s,tot}$ , где  $A_{s,tot}$  – общая площадь арматуры (без учета постоянной площади).

При рассмотрении произвольного сечения применяются две системы координат. В одной системе координат задаются вершины и арматурные слои. Другая система координат применяется для задания усилий.

## 2. Усилия

При расчете стандартного сечения, усилия задаются относительно главных центральных осей  $y, z$ . В случае произвольного сечения, усилия задаются либо относительно главных центральных осей сечения  $y_0, z_0$ , либо относительно центральных осей  $y, z$ , которые параллельны координатным осям, выбранным при вводе вершин и арматурных слоев (см. рис.3). Принимается, что продольная сила  $N$  положительна при сжатии. При действии положительного момента  $M_y$  сжатая зона возникает в верхней части сечения, а при действии положительного момента  $M_z$  сжатая зона возникает в левой части сечения.

Предусмотрены два вида задания усилий: задание усилий от комбинаций воздействий и задание усилий от воздействий. В первом случае, задаются сочетания усилий, которые возникают при действии основных или особых комбинаций воздействий. Во втором случае, задаются воздействия и соответствующие им усилия.

Согласно [2], воздействия подразделяются на постоянные воздействия (например, собственный вес несущих конструкций, встроенного оборудования) и переменные воздействия (например, полезные нагрузки на перекрытия, ветровые и снеговые нагрузки). К особым воздействиям относятся взрывы и удары транспортных средств. Для заданных воздействий генерируется множество возможных основных и особых комбинаций воздействий. Расчет может проводиться для всех полученных комбинаций или для комбинаций, выбранных по наибольшим значениям усилий или выбранных геометрическим методом при помощи построения выпуклой оболочки множества.

Согласно Приложению А.1 [2], коэффициент безопасности  $\gamma_F$  для постоянных воздействий принимается равным 1.35 или 1.0 соответственно при неблагоприятном или благоприятном влиянии воздействия. Для переменных воздействий коэффициент безопасности  $\gamma_F$  принимается равным 1.5 или 0. Предусмотрен ввод других значений коэффициента безопасности  $\gamma_F$  для постоянных и переменных воздействий при их неблагоприятном влиянии. Предусмотрен ввод комбинационных коэффициентов  $\psi_0, \psi_1, \psi_2$  для переменных воздействий, отличающихся от значений в табл. А.1.1 Приложения А.1.

### 3. Расчет

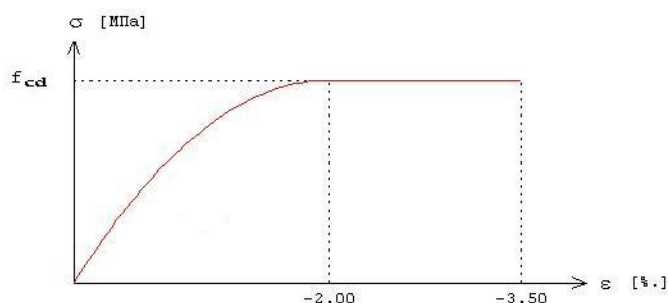
Различаются два вида расчета: определение площади арматуры, требуемой для обеспечения несущей способности, и проверка несущей способности сечения с заданной арматурой.

При определении требуемой арматуры, в зависимости от принятой схемы армирования, либо неизвестна только общая площадь арматуры  $A_{s,tot}$  при заданном распределении арматуры по слоям, либо неизвестны площади арматурных слоев  $A_{si}$  при условии свободного распределении арматуры по слоям. В последнем случае, площади арматурных слоев отыскиваются на основе требования минимума общей площади арматуры.

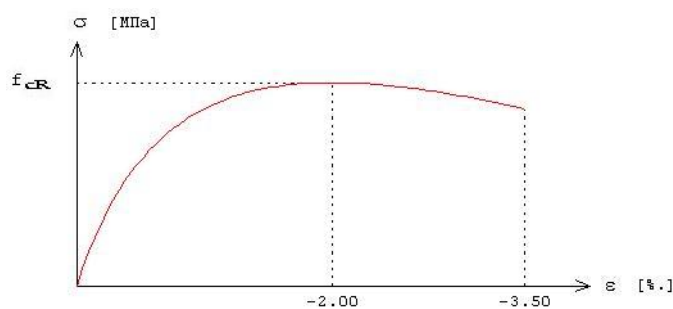
При проверке несущей способности сечения определяется коэффициент безопасности по усилиям  $\gamma_u$ , через который предельные усилия выражаются по формулам:  $N_u = \gamma_u N$ ,  $M_{yu} = \gamma_u M_y$ ,  $M_{zu} = \gamma_u M_z$ . Несущая способность сечения обеспечена при  $\gamma_u \geq 1$ .

Расчет проводится на основе диаграмм деформирования сжатого бетона и арматурной стали. Предусмотрен выбор одной из двух диаграмм состояния сжатого бетона (рис.4). Параболическая диаграмма применяется при линейно-упругом расчете усилий. Криволинейная диаграмма применяется при нелинейном расчете усилий, в котором учитываются неупругие свойства бетона и арматурной стали.

При определении требуемой площади арматуры применяется итерационный алгоритм, позволяющий точно учесть расположение подобранных арматурных стержней. На текущем итерационном шаге, расчет требуемой арматуры проводится на основе результатов конструирования арматуры на предыдущем шаге. При конструировании арматуры с учетом заданных значений минимальной толщины защитного слоя бетона и диаметров подобранных арматурных стержней определяется номинальная толщина защитного слоя бетона. Затем определяются расстояния от контура сечения до центров тяжести площадей арматуры, которые на следующем итерационном шаге ставятся в расчет требуемой арматуры.



а)



б)

Рис. 4. Диаграммы деформирования сжатого бетона:

а) параболическая, б) криволинейная.

В программе предусмотрен режим «Полный вывод», при котором проводится проверка несущей способности для всех расчетных сочетаний усилий, и выводятся следующие результаты: предельные усилия  $N_u, M_{yu}, M_{zu}$  и коэффициент безопасности  $\gamma_u$ , положение нейтральной линии, кривизны  $\kappa_y, \kappa_z$ , деформации  $\varepsilon$  и напряжения  $\sigma$  бетона и арматуры. Если нейтральная линия пересекает сечение, то выводится изображение сжатой зоны сечения (рис.5).

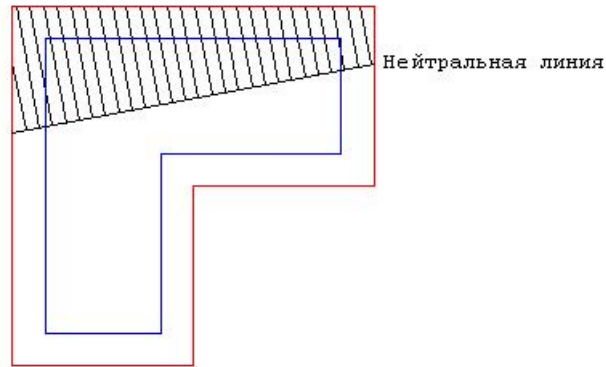


Рис. 5. Пример изображения сжатой зоны сечения

#### 4. Конструирование

При подборе арматурных стержней применяется следующий общий ряд диаметров (в мм): 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 32, 36, 40.

Арматурные стержни размещаются в сечении с учетом номинальной толщины защитного слоя бетона и номинального расстояния в свету между стержнями. Номинальная толщина защитного слоя определяется как  $c_{nom} = c_{min} + \Delta c$ , где  $c_{min}$  принимается не менее диаметра арматуры, значение  $\Delta c$  вводится для учета возможных отклонений от проектных положений арматуры. Толщина защитного слоя бетона принимается кратной 5мм. Значение  $c_{min}$  принимается не менее заданного значения и определяется с учетом следующих условий:  $c_{min} \geq d_{sw}$ ,  $c_{min} + d_{sw} \geq d_s$ , где  $d_{sw}$  – диаметр поперечной арматуры,  $d_s$  – диаметр продольной арматуры.

При конструировании учитываются заданные минимальный и максимальный диаметры стержней, максимальное количество стержней, минимальное расстояние в свету между стержнями. Эти параметры позволяют управлять подбором арматуры. Для схем армирования  $A = 0,1,2$  ограничивается количество стержней в сечении, а для схемы армирования  $A = 3$  – количество стержней в одном ряду.

В сечении со схемой армирования  $A = 0$  в каждом углу может размещаться один арматурный стержень или (при необходимости) более (3 или 5 арматурных стержней). При расчете требуемой арматуры применяется расстояние от контура сечения до общего центра тяжести группы стержней.

В сечении со схемой армирования  $A = 3$  на месте каждого арматурного слоя стержни могут размещаться в два ряда. Стержни второго ряда устанавливаются на таком расстоянии от стержней первого ряда, которое равно наибольшему из значений диаметра стержней первого ряда и минимального расстояния в свету между стержнями. При расчете требуемой арматуры применяется расстояние от контура сечения до линии тяжести обоих рядов стержней.

Для таврового (двутавового) сечения задается доля арматуры в свесах полки (от 0% до 100%). При размещении арматуры в свесах полки требуется указать один из двух возможных случаев размещения. В первом случае, арматурные стержни размещаются на всей ширине полки.

Этот вариант предназначен для расчета балки таврового (двутаврового) сечения. Во втором случае, стержни размещаются в пределах отрезка, длина которого составляет половину ширины полки. Этот вариант предназначен для расчета балки прямоугольного сечения совместно с плитой перекрытия. Арматурные стержни размещаются в полке в один ряд, а в ребре сечения стержни могут размещаться в два ряда.

Задача конструирования арматуры в произвольном полигональном сечении с произвольной схемой армирования не имеет единственного решения, поэтому предусмотрены два метода конструирования: подбор стержней одинакового диаметра и подбор минимального количества стержней.

По результатам конструирования осуществляется графический вывод сечения с подобранными арматурными стержнями (рис.6).



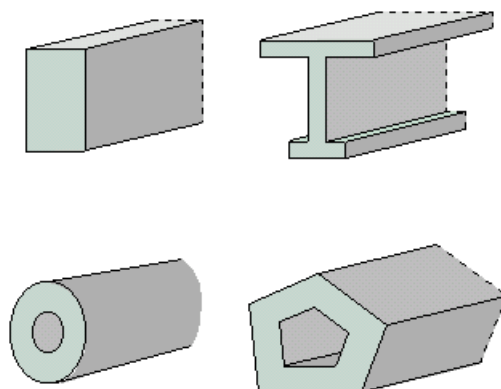
Рис. 6. Пример конструирования арматуры

Предусмотрена проверка несущей способности сечения с подобранными арматурными стержнями. При проверке, каждый стержень учитывается по отдельности, при этом в расчет ставятся площадь его поперечного сечения и координаты центра тяжести. Для всех расчетных сочетаний усилий вычисляются предельные усилия  $N_u, M_{yu}, M_{zu}$  и коэффициент безопасности  $\gamma_u \geq 1$ , по которому можно судить о качестве подбора арматуры. Чем ближе  $\gamma_u$  к единице, тем лучше результат конструирования.

### Литература

1. ТКП EN 1992-1-1: Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций – Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий.
2. СТЬ EN 1990-2007: Еврокод. Основы проектирования несущих конструкций.

## 434 – Подбор продольной арматуры





Программа предназначена для расчёта требуемой продольной арматуры и для проверки несущей способности сечения с имеющейся арматурой, а также для конструирования арматуры в сечении согласно следующим нормам: СНиП 2.03.01-84\* [1], СП 52-101-2003 [2], СНБ 5.03.01-02 [3], [4], [5], [6]. По результатам конструирования осуществляется графический вывод сечения с подобранными арматурными стержнями. Предусмотрено построение диаграмм несущей способности сечения. Возможен подбор арматуры в колонне с учетом прогибов. Допускается задание бетона и/или арматурной стали с ненормированной прочностью. Для сечения балки возможно задание разных сталей верхней и нижней арматуры и задание разных значений минимальной толщины защитного слоя бетона для верхней и нижней арматуры.

## 1. Сечение

Сечения подразделяются на стандартные и произвольные. К стандартным сечениям относятся прямоугольное сечение, тавровое или двутавровое сечение, круговое или кольцевое сечение (рис.1).

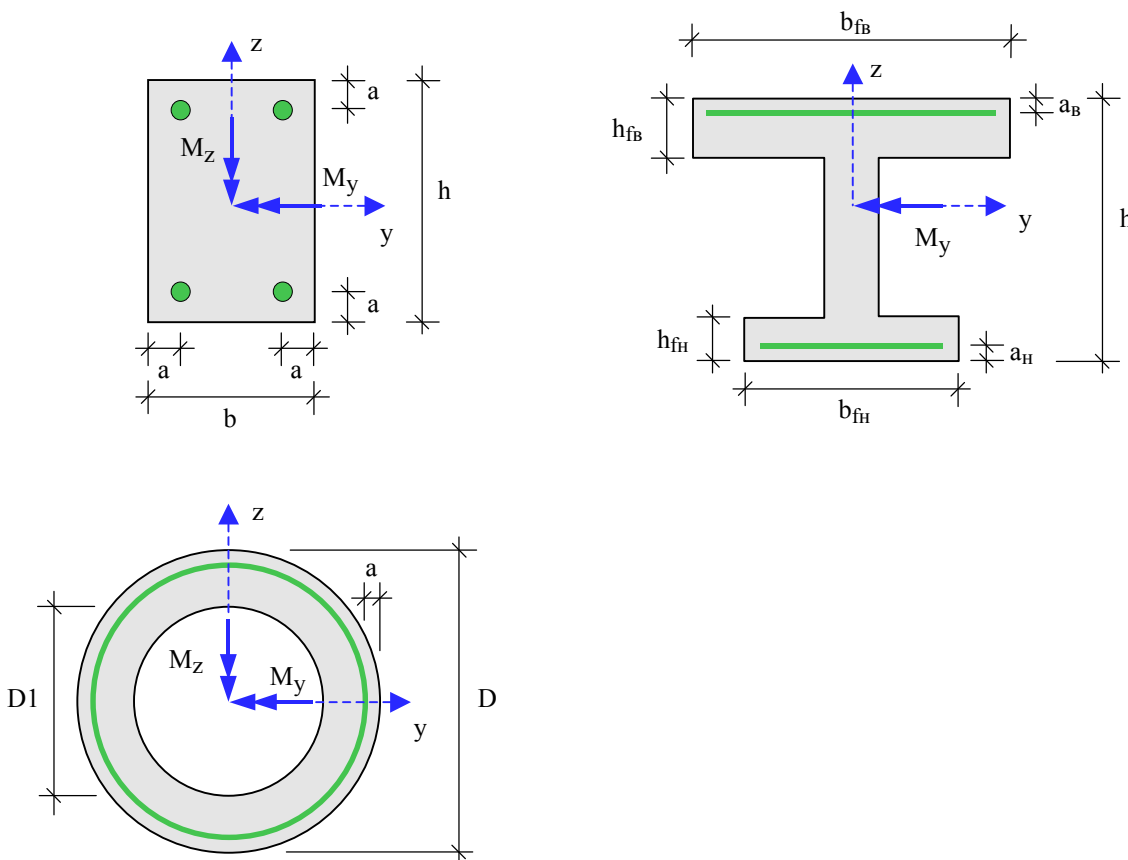


Рис. 1. Стандартные сечения

Для прямоугольного сечения возможны следующие схемы армирования  $A$  (рис.2): схема с равными площадями арматуры вблизи вершин сечения ( $A = 0$ ), схема с равномерным распределением площади арматуры вдоль контура сечения ( $A = 1$ ), схемы с равными ( $A = 2$ ) и с различными ( $A = 3$ ) площадями арматуры вблизи верхней и нижней сторон сечения. Для таврового и двутаврового сечений рассматривается схема армирования  $A = 3$ . Для кругового и кольцевого сечений рассматривается схема армирования с равномерным распределением площади арматуры вдоль контура сечения.

Для сечения со схемой армирования  $A = 3$  предусмотрены два вида распределения общей площади арматуры по арматурным слоям: свободное распределение и заданное распределение. При свободном распределении арматуры площади арматурных слоев не связаны никаким

условием и определяются независимо друг от друга. При заданном распределении арматуры, для каждого арматурного слоя определяется его доля от общей площади арматуры. Доля слоя рассчитывается по заданным относительным площадям как  $k_i = A_i / (A_n + A_v)$ , где  $i = n, v$ ;  $A_n, A_v$  – относительные площади нижнего и верхнего арматурных слоев. Площадь  $i$ -го слоя определяется по формуле  $A_{si} = k_i \cdot A_{s,tot}$ , где  $A_{s,tot}$  – общая площадь арматуры.

При подборе арматуры в колонне с учетом прогибов предусмотрено только заданное распределение общей площади арматуры по слоям.

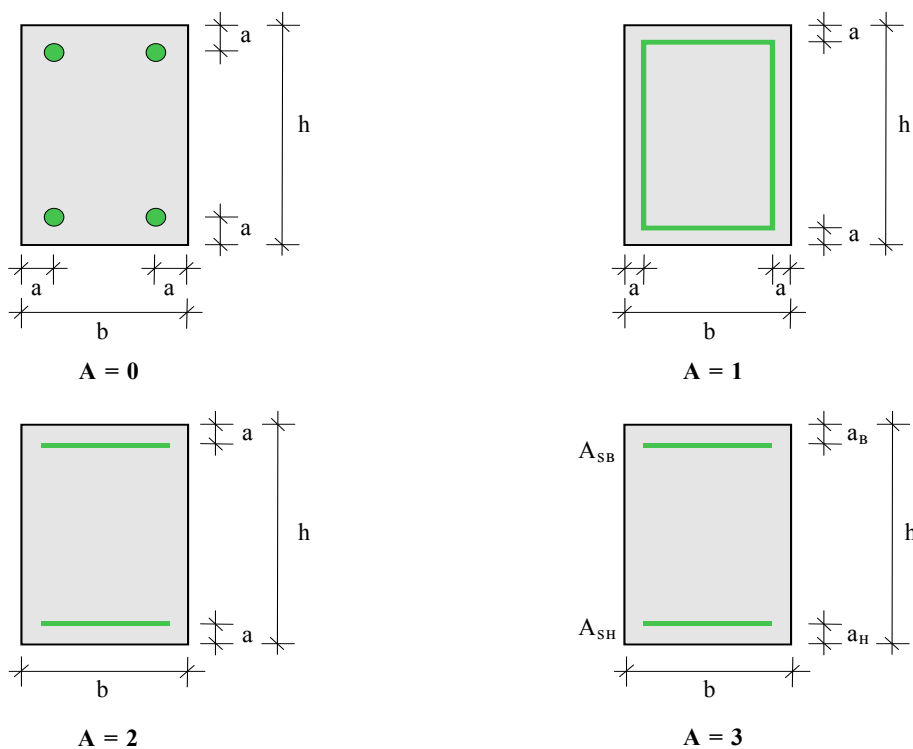


Рис. 2. Схемы армирования прямоугольного сечения

Задание произвольного полигонального сечения осуществляется путем ввода координат его вершин (рис.3). Возможен ввод до 50 вершин. Выбор координатных осей декартовой системы может быть произвольным. Вершины задаются в последовательности, которая соответствует обходу полигона по контуру в определенном направлении. При этом полигональная область должна оставаться по одну сторону (например, слева) от направления обхода. При наличии внутренних полостей в сечении требуется произвести разрезы, позволяющие обойти граничные контуры (внешний и внутренние) так, чтобы область оставалась по одну сторону от направления обхода. Предусмотрен автоматический учет полости прямоугольной формы.

Для полигонального сечения возможны следующие схемы армирования: схема с равными площадями арматуры вблизи вершин внешнего контура сечения ( $A = 0$ ), схема с равномерным распределением площади арматуры вдоль внешнего контура сечения ( $A = 1$ ), произвольная схема армирования. Для схем  $A = 0$  и  $A = 1$  необходимые для расчета координаты арматуры определяются автоматически. При  $A = 0$  исключаются из рассмотрения входящие углы (т.е. углы, большие 180 град). Кроме того, проверяется возможность корректного размещения арматурных стержней при наличии близких вершин.

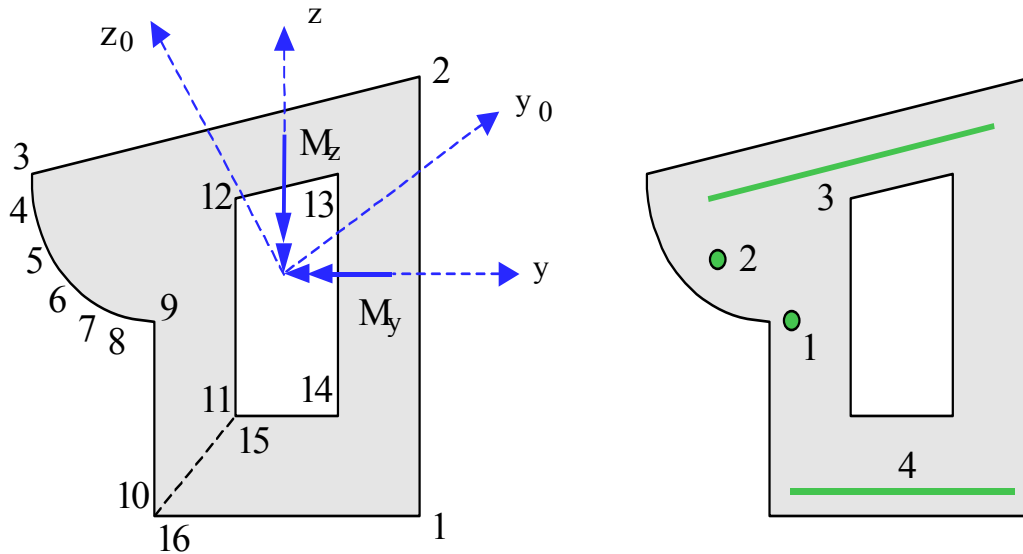


Рис. 3. Произвольное полигональное сечение

При выборе произвольной схемы армирования требуется задать отрезки (арматурные слои), на которых размещается арматура. Возможен ввод до 50 арматурных слоев. Слои могут иметь произвольную длину и ориентацию. Предполагается, что площадь арматуры равномерно распределена по слою. Если длина слоя равна нулю, то такой слой соответствует «сосредоточенной» площади арматуры. Арматурные слои подразделяются на слои с варьируемой площадью и слои с постоянной площадью (не изменяемой при расчете требуемой арматуры). Предусмотрены два вида распределения площади арматуры по арматурным слоям с варьируемой площадью: свободное распределение и заданное распределение.

При свободном распределении арматуры, площади различных арматурных слоев могут быть одинаковыми или различными. Арматурные слои с одинаковой площадью образуют одну группу. Группа может состоять из одного слоя. Нумерация групп начинается с единицы. Если для некоторого арматурного слоя группа не указана, то автоматически образуется отдельная группа, состоящая из одного этого слоя. Площади арматуры, соответствующие различным группам, не связаны никаким условием и определяются независимо друг от друга.

При заданном распределении арматуры, для каждого арматурного слоя с варьируемой площадью определяется его доля от общей площади арматуры (при этом слои с постоянной площадью не учитываются). Доля слоя рассчитывается по заданным относительным площадям как  $k_i = A_i / (A_1 + A_2 + \dots)$ , где  $i = 1, 2, \dots$ ;  $A_1, A_2, \dots$  – относительные площади арматурных слоев с варьируемой площадью. Площадь  $i$ -го слоя определяется по формуле  $A_{si} = k_i \cdot A_{s,tot}$ , где  $A_{s,tot}$  – общая площадь арматуры (без учета постоянной площади).

При подборе арматуры в колонне с учетом прогибов предусмотрено только заданное распределение общей площади арматуры по слоям с варьируемой площадью.

При рассмотрении произвольного сечения, применяются две системы координат. В одной системе координат задаются вершины и арматурные слои. Другая система координат применяется для задания усилий.

## 2. Усилия

При расчете стандартного сечения, усилия задаются относительно главных центральных осей  $y, z$ . В случае произвольного сечения, усилия задаются либо относительно главных центральных осей сечения  $y_0, z_0$ , либо относительно центральных осей  $y, z$ , которые параллельны координатным осям, выбранным при вводе вершин и арматурных слоев. Принимается, что продольная сила  $N$  положительна при сжатии. Направления векторов изгибающих моментов  $M_y, M_z$  показаны на рис.1, 3. При действии положительного момента  $M_y$  сжатая зона возникает в верхней части сечения, а при действии положительного момента  $M_z$  сжатая зона возникает в левой части сечения.

Предполагается, что усилия соответствуют расчетным комбинациям нагрузок, образованным согласно СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия» [7] (при расчете по [1] и [2]) или согласно [3], Приложение А.

## 3. Расчет

Различаются два вида расчета: расчет площади арматуры, требуемой по условию прочности сечения, и проверка несущей способности сечения с заданной площадью арматуры. При расчете требуемой арматуры, в зависимости от принятой схемы армирования, либо неизвестна только общая площадь арматуры  $A_{s,tot}$  при заданном распределении арматуры по слоям, либо неизвестны площади арматурных слоев  $A_{si}$  при условии свободного распределении арматуры по слоям. В последнем случае, площади арматурных слоев отыскиваются на основе требования минимума общей площади арматуры.

При проверке несущей способности сечения определяется коэффициент надежности по усилиям  $\gamma_u$ , через который предельные усилия выражаются по формулам  $N_u = \gamma_u \cdot N$ ,  $M_{yu} = \gamma_u \cdot M_y$ ,  $M_{zu} = \gamma_u \cdot M_z$ . Прочность сечения обеспечена при  $\gamma_u \geq 1$ .

При помощи программы могут решаться следующие задачи: (1) определение требуемой площади арматуры и конструирование арматуры с учетом нормативных требований по толщине защитного слоя бетона, (2) определение требуемой площади арматуры при заданных расстояниях от контура сечения до центров тяжести площадей арматуры, (3) проверка несущей способности сечения и конструирование арматуры, (4) построение диаграмм несущей способности сечения, (5) подбор арматуры в колонне с учетом прогибов.

При решении задачи (1) применяется итерационный алгоритм, позволяющий точно учесть расположение подобранных арматурных стержней. На текущем итерационном шаге расчет требуемой арматуры проводится на основе результатов конструирования арматуры на предыдущем шаге. При конструировании арматуры с учетом заданных значений минимальной толщины защитного слоя бетона для продольной и поперечной арматуры и диаметров подобранных арматурных стержней определяется номинальная толщина защитного слоя бетона. Затем определяются расстояния от контура сечения до центров тяжести площадей арматуры, которые на следующем итерационном шаге ставятся в расчет требуемой арматуры.

Согласно [1], расчет по прочности выполняется в соответствии с 3.28\*. При этом расчет элементов с высокопрочной арматурой классов А-IV, А-V, А-VI, А-VII отличается от расчета элементов с арматурой классов А-I, А-II, А-III, А500С тем, что наряду с формулой (67), применяется формула (68). Кроме того, согласно 3.13\*, при расчете элементов с высокопрочной арматурой расчетное сопротивление арматуры  $R_s$  умножается на коэффициент условий работы  $\gamma_{s6} \geq 1$ , который определяется по формуле (27).

Согласно [2], расчет по прочности проводится на основе нелинейной деформационной модели в соответствии с 6.2.21. Предусмотрен выбор расчетной диаграммы состояния сжатого бетона.

Согласно [3], расчет по прочности проводится на основе нелинейной деформационной модели в соответствии с 7.1.1.2. Предусмотрен выбор одной из двух расчетных диаграмм состояния сжатого бетона. Параболически-линейная диаграмма применяется в том случае, когда усилия определены путем линейно-упругого расчета. Предельные усилия определяются как  $R(\alpha f_{ck} / \gamma_c, f_{yk} / \gamma_s)$ . Криволинейная диаграмма применяется при нелинейном расчете усилий, в котором учитываются неупругие свойства бетона и арматурной стали. Предельные усилия определяются как  $R(f_{cR}, f_{yR}) / \gamma_R$ , где  $f_{cR} = \alpha f_{ck}$ ,  $f_{yR} = 1.1 f_{yk}$ ,  $\gamma_R = 1.35$ .

При подборе арматуры в колонне, влияние прогиба учитывается путем умножения изгибающего момента  $M$  на повышающий коэффициент  $\eta$ . Коэффициент  $\eta$  вычисляется по формуле:

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

где  $N$  - продольная сила,  $N_{cr}$  - критическая сила, которая определяется согласно [1], 3.24, [2], 6.2.16, [3], 7.1.3.14. Формула для критической силы может быть записана в виде:

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

где  $D$  - жесткость колонны,  $l_0$  - расчетная длина колонны.

Согласно [1] жесткость вычисляется по формуле:

$$D = \frac{6.4}{\pi^2} \left[ \frac{E_b I_b}{\varphi_l} \left( \frac{0.11}{0.1 + \delta_e} + 0.1 \right) + E_s I_s \right]$$

Здесь  $E_b, E_s$  - модули упругости бетона и стали;  $I_b, I_s$  - моменты инерции бетонного сечения и площади сечения арматуры относительно центральной оси сечения,  $\delta_e = e_0 / h$  - относительный эксцентриситет продольной силы ( $h$  - высота сечения в плоскости изгиба),  $\varphi_l = 1 + \beta \cdot M_{l1} / M_1$  - параметр, учитывающий длительное действие нагрузки ( $\beta = const$ ). Согласно [3] жесткость вычисляется аналогичным образом. В [2] формула для жесткости имеет вид:

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

Эксцентриситет  $e_0$  определяется относительно центра тяжести приведенного сечения (при несимметричном армировании центры тяжести бетонного и приведенного сечений не совпадают). При определении  $e_0$  учитывается случайный эксцентриситет  $e_a$  ([1], 1.21, [2], 4.2.6, [3], 7.1.2.11). Согласно [1] и [2], при расчете колонны, являющейся элементом статически определимой конструкции, эксцентриситет  $e_0$  принимается равным  $\frac{M}{N} + e_a$ , а при расчете

колонны, являющейся элементом статически неопределимой конструкции, - равным  $\frac{M}{N}$ , если

$\frac{M}{N} \geq e_a$ , и равным  $e_a$ , если  $\frac{M}{N} < e_a$ . Согласно [3], эксцентриситет  $e_0$  всегда принимается

равным  $\frac{M}{N} + e_a$ .

Моменты  $M_1, M_{11}$  вычисляются относительно оси тяжести наиболее растянутой (или наименее сжатой) арматуры по усилиям  $N, M$  от полной нагрузки и по усилиям  $N_l, M_l$  от длительно действующей части нагрузки.

Так как жесткость  $D$  вычисляется с учетом арматуры в сечении, то расчетный момент  $\eta M$  также зависит от площади арматуры. Поэтому требуемая арматура может быть рассчитана только при помощи итераций. На текущем итерационном шаге, для найденной площади арматуры вычисляются коэффициенты  $\eta_y$  и  $\eta_z$ , затем определяются расчетные моменты  $\eta_y M_y$  и  $\eta_z M_z$ , действующие в плоскостях  $Z$  и  $Y$ , а затем вычисляется требуемая площадь арматуры. Далее выполняется следующая итерация. Итерационный процесс оканчивается тогда, когда относительное приращение площади арматуры становится менее 0,1%.

#### 4. Конструирование

При подборе арматурных стержней применяется следующий общий ряд диаметров (в мм): 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 32, 36, 40. По классам арматурной стали могут выбираться стержни следующих диаметров:

[1]: для А-I  $d = 6 - 40$ ; для А-II  $d = 10 - 40$ ; для А-III  $d = 10 - 40$ ; для А-IV  $d = 10 - 32$ ; для А-V  $d = 10 - 32$ ; для А-VI  $d = 10 - 40$ ; для А-VII  $d = 10 - 28$ ; для А500С  $d = 10 - 40$ ;

[2]: для А240  $d = 6 - 40$ ; для А300  $d = 6 - 40$ ; для А400  $d = 6 - 40$ ; для А500  $d = 10 - 40$ ; для В500  $d = 3 - 12$ ;

[3]: для S240  $d = 6 - 40$ ; для S400  $d = 6 - 40$ ; для S500  $d = 6 - 40$ .

Арматурные стержни размещаются в сечении с учетом номинальной толщины защитного слоя бетона и номинального расстояния в свету между стержнями. При определении номинальной толщины защитного слоя бетона учитываются заданные минимальные толщины защитного слоя бетона для продольной и поперечной арматуры, диаметр подобранных стержней и диаметр хомута. При этом толщина защитного слоя бетона для хомута принимается кратной 5 мм.

При конструировании учитываются заданные минимальный и максимальный диаметры стержней, максимальное количество стержней, минимальное расстояние в свету между стержнями. Эти параметры позволяют управлять подбором арматуры. Минимальный диаметр стержней может не принадлежать указанному ряду диаметров для выбранного класса арматурной стали. Для схем армирования  $A = 0, 1, 2$  ограничивается количество стержней в сечении, а для схемы армирования  $A = 3$  – количество стержней в одном ряду.

В сечении со схемой армирования  $A = 0$  в каждом углу может размещаться один арматурный стержень или (при необходимости) более (3 или 5 арматурных стержней). При расчете требуемой арматуры применяется расстояние от контура сечения до общего центра тяжести группы стержней.

В сечении со схемой армирования  $A = 3$  на месте каждого арматурного слоя стержни могут размещаться в два ряда. Стержни второго ряда устанавливаются на таком расстоянии от стержней первого ряда, которое равно наибольшему из значений диаметра стержней первого ряда и минимального расстояния в свету между стержнями. При расчете требуемой арматуры применяется расстояние от контура сечения до линии тяжести обоих рядов стержней.

Для таврового (двутаврового) сечения требуется указать одну из двух возможностей размещения арматуры в полке. Арматурные стержни могут размещаться на всей ширине полки. Этот вариант предназначен для расчета балки таврового (двутаврового) сечения. Другая возможность позволяет при подборе стержней учитывать долю арматуры в свесах полки, которая может задаваться от 0% до 100%. При этом стержни размещаются в пределах отрезка, длина которого составляет половину ширины полки. Этот вариант предназначен для расчета

балки прямоугольного сечения совместно с плитой перекрытия. Арматурные стержни размещаются в полке в один ряд, а в ребре сечения стержни могут размещаться в два ряда.

Задача конструирования арматуры в произвольном полигональном сечении с произвольной схемой армирования не имеет единственного решения, поэтому предусмотрены два метода конструирования: подбор стержней одинакового диаметра и подбор минимального количества стержней.

По результатам конструирования осуществляется графический вывод сечения с подобранными арматурными стержнями. В программе предусмотрен контроль корректности размещения арматурных стержней для сечений различных форм. Если корректное размещение стержней невозможно, то выдается предупреждающее сообщение.

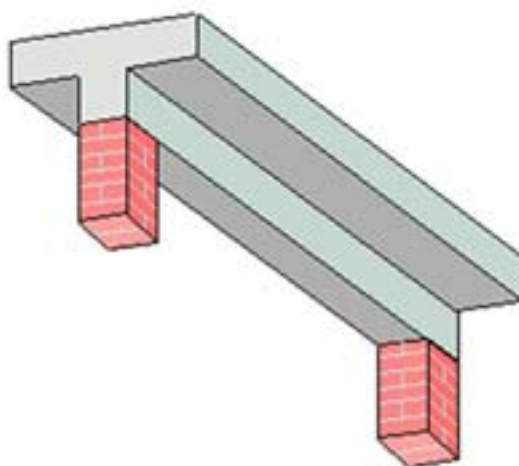
В режиме «Полный вывод» проводится дополнительная проверка несущей способности сечения с подобранными арматурными стержнями. При проверке каждый стержень учитывается по отдельности, при этом в расчет ставятся площадь его поперечного сечения и координаты центра тяжести. Для всех расчетных сочетаний усилий вычисляются предельные усилия  $N_u$ ,  $M_{yu}$ ,  $M_{zu}$  и коэффициент  $\gamma_u \geq 1$ , по которому можно судить о качестве подбора арматуры. Чем ближе  $\gamma_u$  к единице, тем лучше результат конструирования.

## Литература

1. СНиП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 80 с.
2. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры / ГУП «НИИЖБ», ФГУП ЦПП. – М., 2004.
3. СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2003. – 139 с.
4. Бетонные и железобетонные конструкции (Изменение №1 СНБ 5.03.01-02)/ Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2004.
5. Бетонные и железобетонные конструкции (Изменение №3 СНБ 5.03.-01-02)/ Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2006.
6. Бетонные и железобетонные конструкции (Изменение №4 СНБ 5.03.-01-02)/ Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2007.
7. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1987. – 36 с.



## 436 – Подбор поперечной арматуры



Программа предназначена для расчета поперечной арматуры, требуемой для обеспечения прочности по наклонным и пространственным сечениям, а также для конструирования хомутов согласно следующим нормам: СНиП 2.03.01-84\* [1], СП 52-101-2003 [2], СНБ 5.03.01-02 [3]. По результатам конструирования выводится изображение приопорной части элемента с подобранными хомутами.

## 1. Расчетная схема и нагрузки

Рассматривается приопорная часть железобетонного элемента постоянного поперечного сечения. В качестве координаты произвольного поперечного сечения применяется расстояние  $x$  от опоры. Предусмотрены два вида расчета: расчет на изгиб и расчет на кручение с изгибом. При расчете на изгиб учитывается действие поперечной силы и обеспечивается прочность элемента по наклонным сечениям. При расчете на кручение с изгибом учитывается действие крутящего момента, изгибающего момента, поперечной силы и обеспечивается прочность элемента по пространственным сечениям.

Расчеты проводятся для элемента прямоугольного поперечного сечения шириной  $b$  и высотой  $h$ . При расчете на изгиб по [1] и [3] допускается задание таврового (двутаврового) сечения для учета сжатой полки при определении несущей способности бетона сжатой зоны.

Для учета обрывов стержней продольной арматуры предусмотрено разбиение приопорной части элемента на участки с различной продольной арматурой. Для каждого участка задаются расстояния от сторон сечения элемента до центров тяжести площадей продольной арматуры. При расчете на кручение с изгибом дополнительно задаются площади арматуры, расположенной у верхней, нижней и боковой сторон сечения. Площадь боковой арматуры определяется как сумма площадей крайних стержней верхней и нижней арматуры. Предполагается, что площади боковой арматуры у левой и правой сторон сечения одинаковы.

При расчете на изгиб задаются изгибающий момент  $M_o$  и поперечная сила  $Q_o$ , действующие в сечении элемента над гранью опоры. Предусмотрен ввод равномерно распределенной поперечной нагрузки интенсивности  $q$  и сосредоточенных поперечных сил  $Q$ , действующих на верхней грани элемента. Предполагается, что нагрузки  $q$  и  $Q$  направлены вертикально вниз. Изгибающий момент и поперечная сила в произвольном поперечном сечении определяются по усилиям в опорном сечении и заданным нагрузкам на основе уравнений равновесия. При этом величина момента  $M_o$  принимается отрицательной. Если заданная длина приопорной части элемента больше значения  $x_0$ , при котором  $Q(x_0) = 0$  или  $Q$  изменяет знак, то расчет проводится только для  $x \leq x_0$ .

При расчете на кручение с изгибом дополнительно задаются крутящий момент  $T_o$  в опорном сечении, равномерно распределенный крутящий момент интенсивности  $t$  и сосредоточенные крутящие моменты  $T$ . Если заданная длина приопорной части элемента больше значения  $x_0$ , при котором  $T(x_0) = 0$  или  $T$  изменяет знак, то расчет проводится только для  $x \leq x_0$ .

При расчете по [1] и [2] усилия в опорном сечении и нагрузки в пролете должны соответствовать расчетной комбинации нагрузок, образованной согласно [4], а при расчете по [3] - согласно [3], Приложение А.

## 2. Расчет на изгиб

Расчет элемента по прочности проводится согласно [1], пп.3.31\*, 3.32, [2], п.6.2.34, [3], пп.7.2.1.1, 7.2.1.2, 7.2.1.5, 7.2.2.7 - 7.2.2.10.

При расчете по [1] и [3] рассматривается множество наклонных сечений, проходящих через линию границы сжатой зоны расчетного поперечного сечения и линию пересечения грани опоры и надопорного поперечного сечения элемента. Наклонное сечение характеризуется длиной проекции  $c$  на продольную ось элемента ( $c = x$ ). Для каждого наклонного сечения отыскивается длина проекции  $c_0$  опасной наклонной трещины. Она определяется из условия минимума несущей способности бетона сжатой зоны и поперечной арматуры, пересекающей наклонную трещину, т.е. определяется как такое значение  $c_0$ , при котором достигается минимум выражения  $Q_b(c_0) + Q_{sw}(c_0)$ . При этом учитываются следующие ограничения:  $c_0 \leq c$ ,  $c_0 \leq 2h_0$  и  $c_0 \geq h_0$  при  $c \geq h_0$  ( $h_0$  - рабочая высота поперечного сечения). Прочность элемента по наклонному сечению обеспечивается при условии  $Q \leq \min\{Q_b(c_0) + Q_{sw}(c_0)\}$ , где  $Q$  - поперечная сила в нормальном сечении, находящемся на расстоянии  $c$  от опоры ([5], п.3.31). При этом учитывается ограничение  $Q_b \geq Q_{b,\min}$ . Погонная площадь поперечной арматуры  $A_{sw}/s_w$  вычисляется по найденному значению  $c_0$  из выражений  $Q_{sw}(c_0) = q_{sw} \cdot c_0$ ,  $q_{sw} = R_{sw} \cdot A_{sw}/s_w$  при условии  $q_{sw} \geq q_{sw,\min}$ .

При расчете по [2], усилия, воспринимаемые бетоном сжатой зоны и поперечной арматурой, рассматриваются как функции длины проекции  $c_0$  наклонного сечения, проходящего по наклонной трещине:  $Q_b = Q_b(c_0)$ ,  $Q_{sw} = Q_{sw}(c_0)$ . При этом вводятся ограничения  $Q_{b,\min} \leq Q_b \leq Q_{b,\max}$ . Аргумент функции  $Q_{sw}(c_0)$  ограничивается неравенствами  $h_0 \leq c_0 \leq 2h_0$ . Прочность элемента по наклонному сечению обеспечивается при условии  $Q \leq \min\{Q_b(c_0) + Q_{sw}(c_0)\}$ . Погонная площадь поперечной арматуры  $A_{sw}/s_w$  определяется из выражений  $Q_{sw}(c_0) = q_{sw} \cdot c_0$ ,  $q_{sw} = R_{sw} \cdot A_{sw}/s_w$ .

Верхний предел для шага хомутов  $s_{w,\max}$  определяется из условия, согласно которому поперечная сила между хомутами должна полностью восприниматься бетоном сжатой зоны ([5], п.3.29, [2], п.6.2.34).

Наряду с проверкой прочности по наклонной трещине проводится проверка прочности по наклонной полосе между наклонными трещинами на основе условия  $Q \leq Q_{\max}$ , где  $Q_{\max}$  равно правой части условия (72) при расчете по [1], или условия (6.65) при расчете по [2], или условия (7.89) при расчете по [3]. Если это условие не выполняется, то выводится соответствующее сообщение. При расчете по [1] и [3], площадь арматуры, найденная из условия прочности по наклонной трещине, может быть увеличена с целью удовлетворения условия прочности по наклонной полосе.

Производится табличный вывод требуемой погонной площади арматуры  $A_{sw}/s_w$ , верхнего предела  $s_{w,\max}$  для шага хомутов и длины проекции  $c_0$  опасной наклонной трещины. Предусмотрен вывод графика распределения требуемой погонной площади арматуры на приопорной части элемента. Поскольку при расчете по прочности арматура учитывается на длине  $c_0$ , то для каждого расчетного сечения с координатой  $x$  производится корректировка распределения площади арматуры на отрезке  $[x - c_0, x]$  по условию, согласно которому площадь арматуры на этом отрезке должна быть не меньше, чем в точке  $x$ .

Предусмотрен вывод графиков  $M(x)$ ,  $Q(x)$ ,  $Q_b(x)$ ,  $Q_{sw}(x)$ ,  $Q_b(x) + Q_{sw}(x)$ . С целью визуальной проверки условия прочности  $Q \leq Q_b + Q_{sw}$  на рисунке с графиком  $Q_b(x) + Q_{sw}(x)$  дополнительно изображается график  $Q(x)$ .

### 3. Расчет на кручение с изгибом

Расчет элемента по прочности проводится согласно [1], пп.3.36 - 3.38, [2], пп.6.2.36 – 6.2.42, [3], пп.7.3.1.1 - 7.3.1.5. При расчете рассматривается множество поперечных сечений, в которых действуют изгибающий момент  $M$ , поперечная сила  $Q$  и крутящий момент  $T$ . Предусмотрены два вида расчета: расчет по прочности пространственных сечений и расчет по прочности элемента между пространственными сечениями.

При расчете по прочности пространственных сечений рассматриваются три схемы разрушения. Эти схемы отличаются расположением сжатой зоны пространственного сечения. В первой схеме, сжатая зона располагается у грани элемента, сжатой от изгиба. Во второй схеме, сжатая зона располагается у боковой грани элемента. В третьей схеме, сжатая зона располагается у грани элемента, растянутой от изгиба.

Для всех схем разрушения условие прочности пространственных сечений может быть записано в виде:

$$T_i \leq a_{1i} / c_i + a_{2i} \cdot c_i$$

Здесь  $i$  - номер схемы ( $i=1,2,3$ ),  $c_i$  - длина проекции сжатой стороны пространственного сечения на продольную ось элемента,  $a_{1i}$  - величина, зависящая от площади  $A_{si}$  продольной арматуры, расположенной у растянутой грани,  $a_{2i}$  - величина, зависящая от погонной площади  $A_{swi} / s_{wi}$  поперечной арматуры, расположенной у растянутой грани,  $T_1 = T_3 = T$ ,  $T_2 = T + Qb / 2$ . Правая часть условия прочности представляет собой функцию от  $c_i$ . Предельный крутящий момент  $T_{0i}$  равен минимальному значению этой функции. При отыскании длины проекции  $c_i$ , для которой достигается минимум, учитываются следующие ограничения:

$$c_i \leq 2h_i + b_i$$

$$c_i \leq b_i \sqrt{\frac{2}{b_i / (2h_i + b_i)}}$$

Здесь  $b_i, h_i$  - размеры проекции пространственного сечения на плоскость, перпендикулярную к оси элемента. Для первой и третьей схем  $b_i = b$ ,  $h_i = h$ , для второй схемы  $b_i = h$ ,  $h_i = b$ .

Соотношение между площадями продольной и поперечной арматуры, которые учитываются в расчете по прочности, определяется для каждой схемы разрушения при помощи следующего параметра:

$$\varphi_{wi} = \frac{R_{sw} A_{swi}}{R_s A_{si}} \cdot \frac{b_i}{s_{wi}}$$

Согласно [1], значение  $\varphi_{wi}$  должно быть не меньше, чем

$$\varphi_{wi, \min} = \frac{0.5}{1 + M / (2\varphi_{wi} M_{ui})}$$

и не больше, чем

$$\varphi_{wi, \max} = 1.5(1 - M / M_{ui})$$

В этих формулах для второй схемы слагаемое, содержащее  $M$ , полагается равным нулю, а для третьей схемы знак перед  $M$  изменяется на обратный.

Предельный изгибающий момент  $M_{ui}$  определяется по формуле  $M_{ui} = R_s A_{si} (h_{0i} - 0.5x_i)$ , где  $x_i$  - высота сжатой зоны, выражающаяся по формуле  $x_i = (R_s A_{si} - R_{sc} A'_{si}) / (R_b b_i)$ .

Если вычисленное значение  $x_i$  меньше  $2a'_i$ , то полагается  $x_i = 2a'_i$ . Здесь  $A'_{si}$  - площадь арматуры в сжатой зоне,  $a'_i$  - расстояние от грани сечения до центра тяжести сжатой арматуры.

При  $\varphi_{wi} < \varphi_{wi,\min}$  в расчете учитывается площадь продольной арматуры, равная  $A_{si} \cdot \varphi_{wi} / \varphi_{wi,\min}$ .

Требуемая по расчету поперечная арматура должна быть размещена на длине

$$c_{swi} = \frac{b_i}{2h_i + b_i} c_i$$

Согласно [2], расчет по прочности пространственных сечений при действии только крутящего момента  $T$  проводится аналогично на основе условия:

$$T \leq T_{0i}$$

Здесь  $i$  - номер схемы разрушения ( $i = 1, 2, 3$ ). Принимается, что  $\varphi_{wi,\min} = 0.5$  и  $\varphi_{wi,\max} = 1.5$ .

При совместном действии крутящего момента  $T$  и изгибающего момента  $M$  условие прочности при  $i = 1$  представляется в виде:

$$T \leq T_{0i} \sqrt{1 - (M / M_0)^2}$$

Предельный изгибающий момент  $M_0$  определяется согласно [2], п.6.2.10 по формуле (6.14).

При совместном действии крутящего момента  $T$  и поперечной силы  $Q$  условие прочности при  $i = 2$  представляется в виде

$$T \leq T_{0i} (1 - Q / Q_0)$$

Предельная поперечная сила  $Q_0$  определяется согласно [2], п.6.2.34 в соответствии с формулой (6.70).

Расчет по прочности пространственных сечений согласно [3] аналогичен расчету по [1].

Согласно [1] и [3], предусмотрена замена при  $T \leq 0.5Qb$  расчета по прочности для второй схемы разрушения на расчет по прочности наклонных сечений при расчетной поперечной силе  $Q + 3T/b$ .

Наряду с расчетом по прочности пространственных сечений проводится расчет по прочности элемента между пространственными сечениями. Если условие прочности вида  $T \leq T_{\max}$  при расчете по [1] и [3] или условие прочности вида  $T \leq T_{\max} (1 - Q / Q_{\max})$  при расчете по [2] не выполняется, то выводится соответствующее сообщение. Здесь  $T_{\max} = 0.1R_b b^2 h$  при расчете по [1], [2] и  $T_{\max} = 0.1\alpha f_{cd} b^2 h$  при расчете по [3], причем  $b = \min\{b, h\}$ ,  $Q_{\max} = 0.3R_b b h_0$ . Согласно [1], п.3.37, расчетное сопротивление  $R_b$  для бетона класса выше В30 принимается как для бетона класса В30. Согласно [3] п.7.3.1.4, расчетное сопротивление  $f_{cd}$  для бетона класса выше С25/30 принимается как для бетона класса С25/30. Коэффициент  $\alpha$  принимается согласно [3], п.6.1.5.4.

Расчет по прочности пространственных сечений проводится при заданных площадях продольной арматуры. Если заданная продольная арматура является недостаточной для обеспечения прочности, то выводятся требуемые площади продольной арматуры, найденные совместно с требуемой площадью поперечной арматуры.

Производится табличный вывод требуемой погонной площади поперечной арматуры  $A_{sw} / s_w$  и длины  $c_{sw}$  отрезка, на котором должна быть размещена поперечная арматура ( $c_{sw} = \max c_{swi}$ ,  $i = 1, 2, 3$ ). В таблице выводятся значения отношения  $T / T_u$ , где  $T_u$  правая часть условия

прочности, вычисленная для трех схем разрушения. Прочность элемента обеспечена при  $T/T_u \leq 1.0$ . При замене расчета по второй схеме разрушения на расчет по прочности наклонных сечений соответствующее значение отсутствует. Пропуск значения  $T/T_u$  для третьей схемы означает, что при данном изгибающем моменте разрушение по третьей схеме невозможно.

Предусмотрен вывод графика распределения требуемой погонной площади поперечной арматуры на приопорной части элемента. Поскольку при расчете по прочности для  $i$ -й схемы разрушения поперечная арматура учитывается на длине  $c_{swi}$ , то для каждого расчетного сечения с координатой  $x$  производится корректировка распределения площади поперечной арматуры на отрезке  $[x - 0.5c_{sw}, x + 0.5c_{sw}]$  по условию, согласно которому площадь поперечной арматуры на этом отрезке должна быть не меньше, чем в точке  $x$ .

Предусмотрен вывод графиков  $M(x), Q(x), T(x)$ .

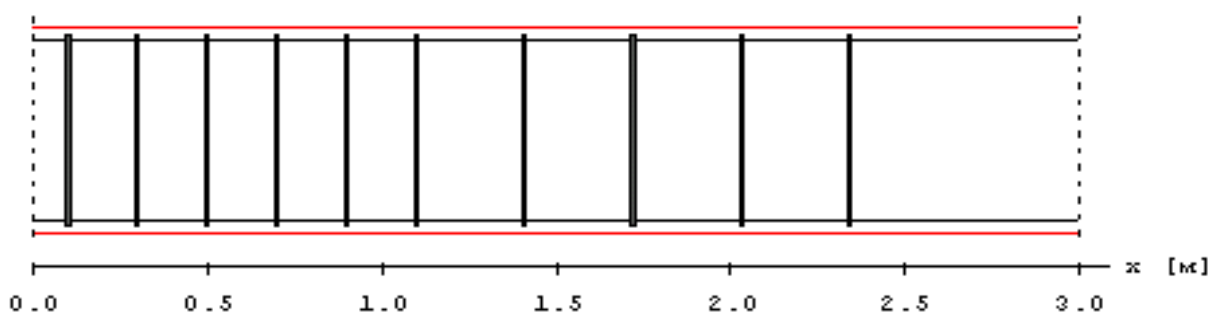
#### 4. Конструирование

При конструировании хомутов применяются следующие данные: диаметр хомутов, максимальный шаг хомутов, приращение шага хомутов, а также расстояние от грани опоры до оси первого хомута. При расчете на изгиб дополнительно задается число ветвей хомута (количество поперечных стержней в нормальном сечении).

Подбор хомутов заключается в определении шага хомутов и длин участков, на которых хомуты устанавливаются с постоянным шагом. Шаг хомутов на первом от опоры участке определяется по наибольшему значению требуемой погонной площади арматуры  $(A_{sw}/s_w)_{\max}$ . Шаг хомутов ограничивается заданным при вводе максимальным значением шага. При расчете на изгиб шаг хомутов дополнительно ограничивается расчетным верхним пределом  $s_{w,\max}$ . На втором от опоры участке шаг хомутов может быть принят тем же или, если это возможно, увеличен на заданное приращение шага. Для определения числа хомутов требуется задать расстояние от грани опоры до оси первого хомута. Это расстояние может быть задано равным половине шага или полному шагу хомутов. Иное смещение должно задаваться вводом соответствующего положительного или отрицательного значения. При задании отрицательного смещения первый хомут устанавливается в надпорной части элемента. Абсолютная величина заданного смещения принимается не большей, чем  $h/2$ .

При задании приращения шага хомутов может быть введено как положительное, так и нулевое или отрицательное значение. В случае ввода отрицательного значения конструирование производится без изменения шага хомутов. При вводе нулевого значения автоматически определяется такое приращение шага, при котором общее число хомутов является минимально возможным.

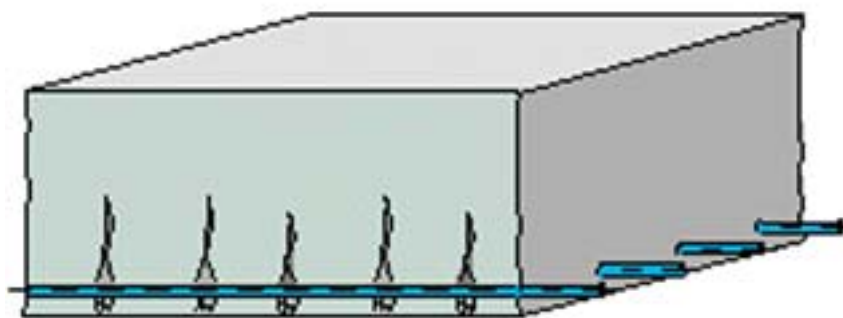
По результатам конструирования выводится изображение приопорного участка элемента с подобранными хомутами.



## Литература

1. СНиП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 80 с.
2. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры / ГУП «НИИЖБ», ФГУП ЦПП. – М., 2004.
3. СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2003. – 139 с.
4. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1987. – 36 с.
5. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелых и легких бетонов без предварительного напряжения арматуры (к СНиП 2.03.01-84) / ЦНИИпромзданий Госстроя СССР, НИИЖБ Госстроя СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 192 с.

## 437 – Расчет по трещиностойкости





Программа предназначена для расчёта по образованию и раскрытию трещин, нормальных к продольной оси элемента, при прямом или косом изгибе согласно следующим нормам: СНиП 2.03.01-84\* [1], СП 52-101-2003 [2], СНБ 5.03.01-02 [3], [4]. Продольная арматура либо задается, либо подбирается по усилиям от расчетных нагрузок. Предусмотрено определение арматуры, требуемой для ограничения ширины раскрытия трещин.

## 1. Сечение

Сечения подразделяются на стандартные и произвольные. К стандартным сечениям относятся прямоугольное сечение, тавровое или двутавровое сечение, круговое или кольцевое сечение (рис.1). Расчет согласно [1] может проводиться для прямоугольного и таврового (двутаврового) сечений, а расчет согласно [2] и [3] – для всех сечений.

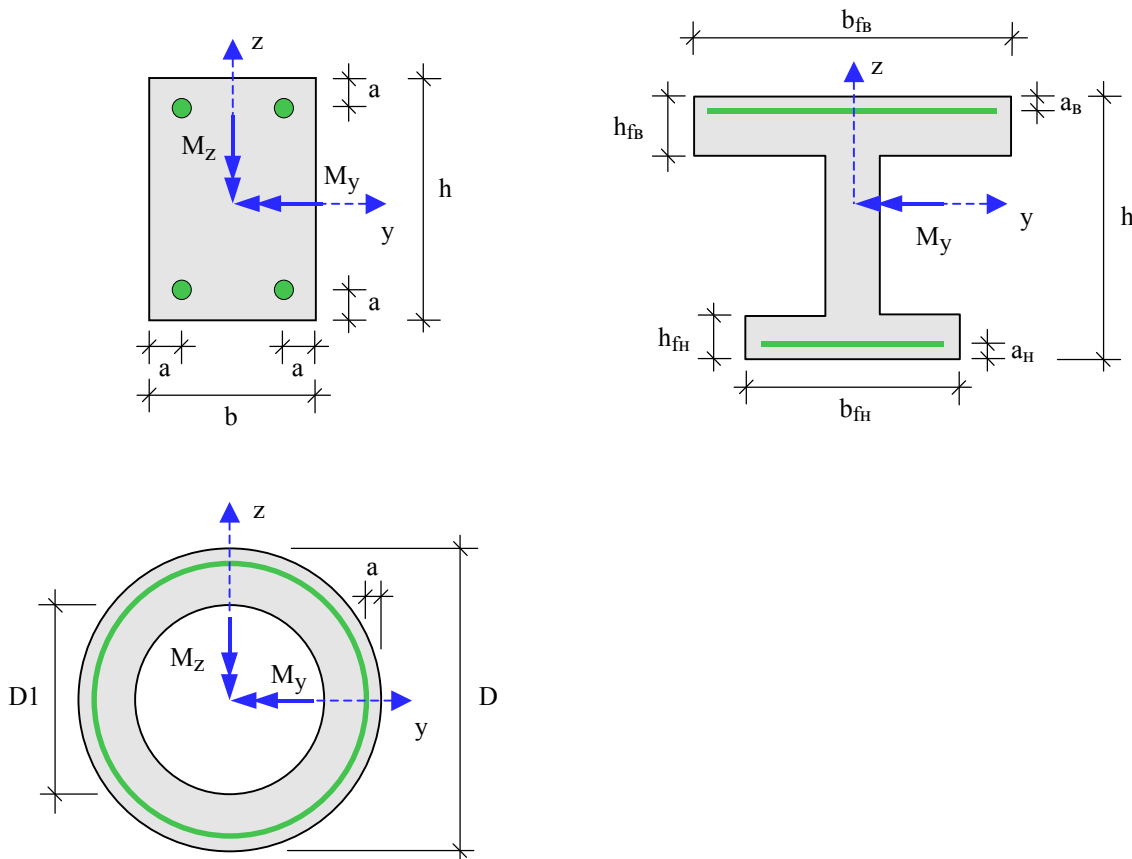


Рис. 1. Стандартные сечения

Для прямоугольного сечения возможны следующие схемы армирования  $A$  (рис.2): схема с равными площадями арматуры вблизи вершин сечения ( $A = 0$ ), схема с равномерным распределением площади арматуры вдоль контура сечения ( $A = 1$ ), схемы с равными ( $A = 2$ ) и с различными ( $A = 3$ ) площадями арматуры вблизи верхней и нижней сторон сечения. Для таврового и двутаврового сечений рассматривается схема армирования  $A = 3$ . Для кругового и кольцевого сечений рассматривается схема армирования с равномерным распределением площади арматуры вдоль контура сечения.

Задание произвольного полигонального сечения осуществляется путем ввода координат его вершин (рис.3). Возможен ввод до 50 вершин. Выбор координатных осей декартовой системы может быть произвольным. Вершины задаются в последовательности, которая соответствует обходу полигона по контуру в определенном направлении. При этом полигональная область должна оставаться по одну сторону (например, слева) от направления обхода. При наличии

внутренних полостей в сечении требуется произвести разрезы, позволяющие обойти граничные контуры (внешний и внутренние) так, чтобы область оставалась по одну сторону от направления обхода. Предусмотрен автоматический учет полости прямоугольной формы.

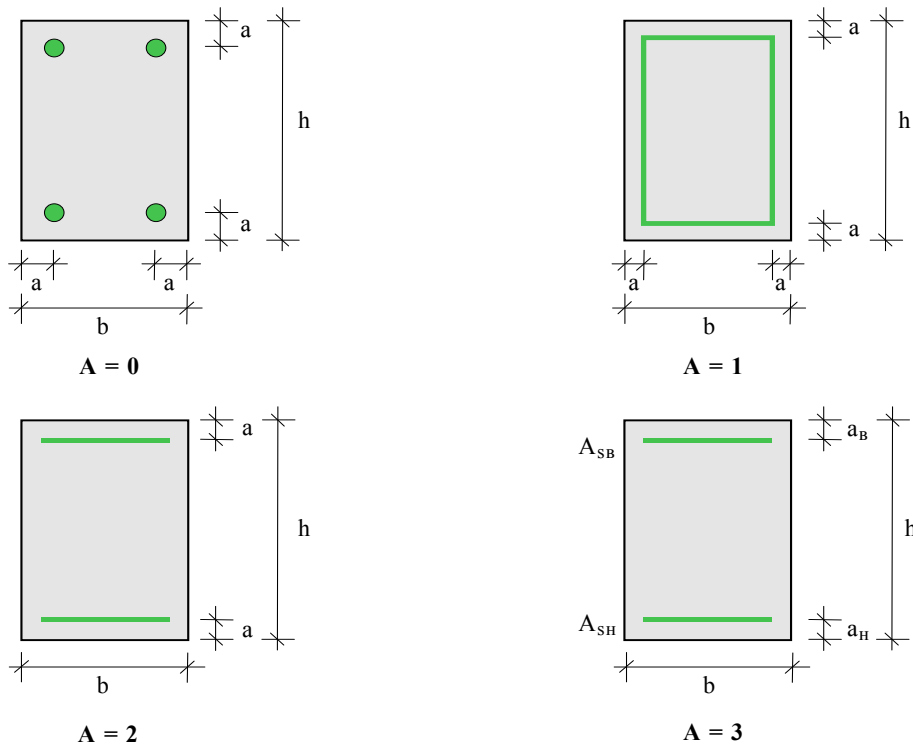


Рис. 2. Схемы армирования прямоугольного сечения

При вводе арматуры в произвольном сечении требуется задать отрезки (арматурные слои), на которых размещается арматура. Возможен ввод до 50 арматурных слоев. Слои могут иметь произвольную длину и ориентацию. Предполагается, что площадь арматуры равномерно распределена по слою. Если длина слоя равна нулю, то такой слой соответствует «сосредоточенной» площади арматуры. Если не предусматривается конструирование арматуры при помощи программы, то для каждого арматурного слоя требуется дополнительно задать диаметр арматурных стержней.

## 2. Усилия

Продольная сила и изгибающие моменты задаются относительно главных центральных осей  $y, z$  бетонного сечения. Принимается, что продольная сила  $N$  положительна при сжатии. При действии положительного момента  $M_y$  сжатая зона возникает в верхней части сечения, а при действии положительного момента  $M_z$  сжатая зона возникает в левой части сечения. При расчете по трещиностойкости согласно [1] и [2] усилия соответствуют комбинациям нормативных нагрузок ( $\gamma_f = 1$ ), образованным согласно СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия» [5], а при расчете согласно [3], усилия соответствуют практически постоянным комбинациям нагрузок ( $\gamma_F = 1$ ), образованным согласно Приложению А. При расчете по [1] и [2] наряду с усилиями от полной нагрузки задаются усилия от длительно действующей части нагрузки.

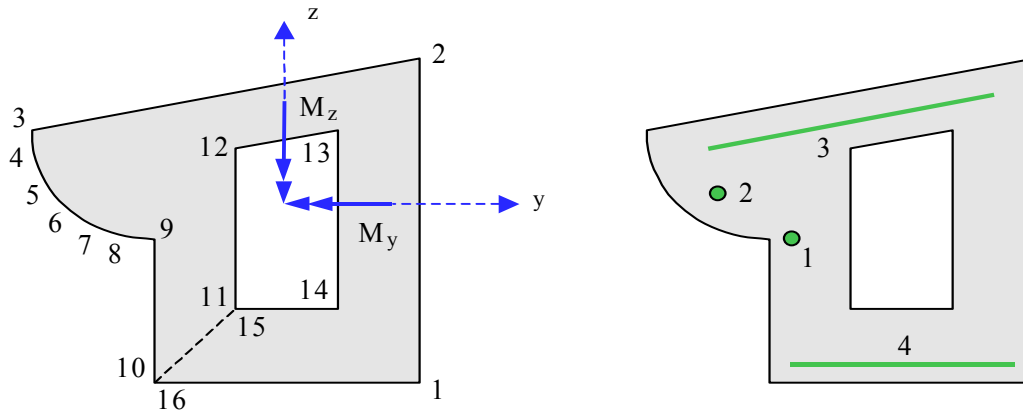


Рис. 3. Произвольное полигональное сечение

### 3. Расчет

Расчет по образованию и раскрытию трещин, нормальных к продольной оси элемента, выполняется согласно [1], пп.4.5, 4.14, [2], пп.7.2.11, 7.2.12, [3], пп.8.2.1.7 – 8.2.1.10. Изгибающие моменты при образовании трещин определяются по предельному состоянию растянутого бетона. При этом учет продольной силы  $N$  возможен одним из двух способов. Если продольная сила и изгибающие моменты возникают от действия разных источников нагрузок, то следует положить  $N = const$ , а если они возникают от действия одного источника нагрузок и возрастают одновременно, то следует положить  $e_y = M_y / N = const$  и  $e_z = M_z / N = const$ .

Расчет согласно [1], проводится при помощи формул, приведенных в [1] и [6]. Предусмотрен вывод промежуточных результатов расчета, при этом применяются обозначения, принятые в нормах.

Расчет согласно [2] проводится на основе нелинейной деформационной модели. Изгибающие моменты  $M_{y,cr}$  и  $M_{z,cr}$  при образовании трещин, а также напряжения в растянутой арматуре после образования трещин  $\sigma_s$  и  $\sigma_{s,cr}$ , входящие в формулы (7.13) и (7.22), вычисляются на основе диаграмм состояния бетона и арматурной стали при помощи численного метода. Предусмотрен выбор расчетной диаграммы состояния бетона в сжатой и растянутой зонах сечения. Согласно пп.5.1.22, 5.1.24, применяются диаграммы с деформационными характеристиками, соответствующими непродолжительному действию нагрузки. Площадь сечения растянутого бетона  $A_{bt}$  и площадь сечения растянутой арматуры  $A_s$ , через которые по формуле (7.21) вычисляется базовое расстояние  $l_s$  между трещинами, определяются непосредственно перед образованием трещин. Значение  $A_{bt}$  определяется при следующих ограничениях на высоту растянутой зоны:  $h_t \geq 2a$ ,  $h_t \leq h/2$ , где  $a$  – расстояние от наиболее растянутой арматуры до ближайшей грани сечения,  $h$  – сумма высот растянутой и сжатой зон сечения, определяемых аналогично [1], стр.37, черт.8. Значение  $A_s$  определяется как сумма площадей  $A_{si}$  арматурных слоев с учетом средних по слою деформаций растяжения  $\varepsilon_i$  по формуле  $A_s = \sum_i A_{si} \cdot (\varepsilon_i / \varepsilon_{max})$ , где  $\varepsilon_{max}$  – деформация наиболее растянутой арматуры.

Расчет согласно [3] проводится на основе нелинейной деформационной модели. Изгибающие моменты  $M_{y,cr}$ ,  $M_{z,cr}$  при образовании трещин, деформация растянутой арматуры  $\varepsilon_s$ , напряжения в растянутой арматуре после образования трещин  $\sigma_s$  и  $\sigma_{sr}$  вычисляются на основе диаграмм состояния бетона и арматурной стали при помощи численного метода. Предусмотрен

выбор одной из двух расчетных диаграмм состояния сжатого бетона. Параболически-линейная диаграмма применяется в том случае, когда усилия определены путем линейно-упругого расчета. Криволинейная диаграмма применяется при нелинейных расчетах усилий, в которых учитываются неупругие свойства бетона и арматурной стали. Моменты  $M_{y,cr}$ ,  $M_{z,cr}$  определяется из условия достижения на наиболее растянутой грани сечения напряжения  $f_{ctm}$ . При этом состояние растянутого бетона описывается линейной диаграммой, соответствующей модулю упругости  $E_{cm}$ . Эффективная площадь растянутой зоны  $A_{c,eff}$  определяется при высоте  $h_{c,eff} = 2.5a$ , которая ограничивается условиями  $h_{c,eff} \leq h_t/2$  и  $h_{c,eff} \leq h/2$ , где  $h_t$  - высота растянутой зоны непосредственно перед образованием трещин,  $h$  - сумма высот растянутой и сжатой зон сечения.

При расчете по образованию трещин согласно [2] и [3] предусмотрен вывод деформаций и напряжений, а также положения нейтральной линии непосредственно перед образованием трещин.

В случае, когда ширина раскрытия трещин превышает предельно допустимое значение, программа позволяет рассчитать требуемую площадь арматуры. При этом площадь арматуры увеличивается до того значения, при котором удовлетворяются условия по трещиностойкости. Одновременно с увеличением площади арматуры может проводиться конструирование арматуры в сечении.

#### 4. Конструирование

В программе предусмотрена возможность подбора арматурных стержней по заданной площади продольной арматуры. В расчет по трещиностойкости ставятся площади и диаметры подобранных стержней, и учитывается их размещение в сечении. При подборе арматурных стержней применяется следующий общий ряд диаметров (в мм): 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 32, 36, 40. По классам арматурной стали могут выбираться стержни следующих диаметров:

[1]: для А-I  $d = 6 - 40$ ; для А-II  $d = 10 - 40$ ; для А-III  $d = 10 - 40$ ; для А-IV  $d = 10 - 32$ ; для А-V  $d = 10 - 32$ ; для А-VI  $d = 10 - 40$ ; для А-VII  $d = 10 - 28$ ; для А500С  $d = 10 - 40$ ;

[2]: для А240  $d = 6 - 40$ ; для А300  $d = 6 - 40$ ; для А400  $d = 6 - 40$ ; для А500  $d = 10 - 40$ ; для В500  $d = 3 - 12$ ;

[3]: для S240  $d = 6 - 40$ ; для S400  $d = 6 - 40$ ; для S500  $d = 6 - 40$ .

Арматурные стержни размещаются в сечении с учетом номинальной толщины защитного слоя бетона и номинального расстояния в свету между стержнями. При определении номинальной толщины защитного слоя бетона учитываются заданные минимальные толщины защитного слоя бетона для продольной и поперечной арматуры, диаметр подобранных стержней и диаметр хомута. При этом толщина защитного слоя бетона для хомута принимается кратной 5 мм.

При конструировании учитываются заданные минимальный и максимальный диаметры стержней, максимальное количество стержней, минимальное расстояние в свету между стержнями. Эти параметры позволяют управлять подбором арматуры. Минимальный диаметр стержней может не принадлежать указанному ряду диаметров для выбранного класса арматурной стали. Для схем армирования  $A = 0, 1, 2$  ограничивается количество стержней в сечении, а для схемы армирования  $A = 3$  - количество стержней в одном ряду.

В сечении со схемой армирования  $A = 0$  в каждом углу может размещаться один арматурный стержень или (при необходимости) более (3 или 5 арматурных стержней). При расчете требуемой арматуры применяется расстояние от контура сечения до общего центра тяжести группы стержней.

В сечении со схемой армирования  $A = 3$  на месте каждого арматурного слоя стержни могут размещаться в два ряда. Стержни второго ряда устанавливаются на таком расстоянии от стержней первого ряда, которое равно наибольшему из значений диаметра стержней первого ряда и минимального расстояния в свету между стержнями. При расчете применяется расстояние от контура сечения до линии тяжести обоих рядов стержней.

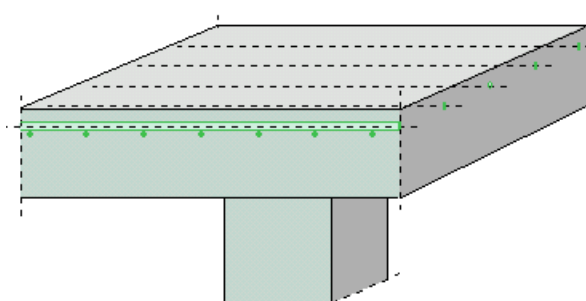
Для таврового (двутаврового) сечения требуется указать одну из двух возможностей размещения арматуры в полке. Арматурные стержни могут размещаться на всей ширине полки. Другая возможность позволяет при подборе стержней учитывать долю арматуры в свесах полки, которая может задаваться от 0% до 100%. При этом стержни размещаются в пределах отрезка, длина которого составляет половину ширины полки. Арматурные стержни размещаются в полке в один ряд, а в ребре сечения стержни могут размещаться в два ряда.

По результатам конструирования осуществляется графический вывод сечения с подобранными арматурными стержнями.

## Литература

1. СНиП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 80 с.
2. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры / ГУП «НИИЖБ», ФГУП ЦПП. – М., 2004.
3. СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2003. – 139 с.
4. Бетонные и железобетонные конструкции (Изменение №1 СНБ 5.03.01-02)/ Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2004.
5. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1987. – 36 с.
6. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелых и легких бетонов без предварительного напряжения арматуры (к СНиП 2.03.01-84) /ЦНИИпромзданий Госстроя СССР, НИИЖБ Госстроя СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 192 с.

## 440 – Расчет на продавливание



Программа предназначена для расчёта на продавливание плиты, воспринимающей нагрузки от колонн прямоугольного или круглого сечения, согласно следующим нормам: СНиП 2.03.01-84\* [1], СП 52-101-2003 [2], СНБ 5.03.01-02 [3], [4], ТКП EN 1992-1-1 [5]. Предусмотрен учет влияния свободных краев плиты. Если прочность плиты без поперечной арматуры не обеспечена, то производится конструирование арматуры. При расчете по [2] в случае колонны прямоугольного сечения рассматриваются два вида расположения арматуры: равномерное и крестообразное. По результатам конструирования выводится картина размещения хомутов. Допускается задание бетона и/или арматуры с ненормированной прочностью.

## 1. Расчетная схема и нагрузка

Рассматривается железобетонная плита толщиной  $h$ , опирающаяся на колонну прямоугольного или круглого сечения. В плоскости плиты вводится декартова 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  $y$ .

Нагрузка на плиту, действующая в пределах сечения колонны, характеризуется значением результирующей силы  $F$ . Неравномерность распределения нагрузки по грузовой площади и, следовательно, неравномерность распределения напряжений в расчетном поперечном сечении плиты при продавливании в расчете по [1] не учитывается. В расчете по [2] и [5] предусмотрено задание моментов  $M_x, M_y$  относительно осей  $x, y$  соответственно. Согласно [2] 6.2.46, при расчете на продавливание следует учитывать только половины сосредоточенных моментов, действующих на плиту. При расчете по [3], неравномерность распределения напряжений в расчетном поперечном сечении плиты учитывается путем увеличения расчетной продавливающей силы в зависимости от расположения колонны относительно краев плиты. При расчете по [5] коэффициент учета моментов определяется по заданным моментам  $M_x, M_y$ .

Если расчет на продавливание проводится для фундаментной плиты, то продавливающая сила уменьшается на величину результирующей силы реактивного давления грунта, действующего в пределах расчетной области. Согласно [1] и [2], расчетной областью является нижнее (большее) основание пирамиды продавливания, расположенное на уровне растянутой продольной арматуры. По [3] и по [5], в качестве расчетной области принимается область, ограниченная расчетным контуром.

## 2. Расчет по СНиП 2.03.01-84\*

Расчет плиты на продавливание проводится согласно [1], 3.42. Условие прочности плиты, армированной хомутами в пределах расчетной области, имеет вид:

$$F \leq F_b + 0.8 \cdot F_{sw}$$

Здесь  $F_b = \alpha R_{bt} u_m h_0$ ,  $F_{sw} = \sum_1^n R_{sw} A_{sw}$ ,  $R_{sw} = 175$  МПа,  $\alpha$  - коэффициент, зависящий от вида бетона,  $R_{bt}$  - расчетное сопротивление бетона при растяжении (с учетом коэффициента условий работы бетона  $\gamma_b$ ),  $u_m$  - среднее значение периметров оснований пирамиды продавливания,  $h_0 = (h_{0x} + h_{0y})/2$  - средняя рабочая высота сечения плиты,  $A_{sw}$  - площадь сечения одного хомута,  $n$  - число хомутов, расположенных в пределах расчетной области.



Прочность плиты без поперечной арматуры проверяется при  $F_{sw} = 0$ . Если прочность не обеспечена, то определяется число хомутов  $n_0$ , требуемое для выполнения условия прочности и дополнительного условия  $F_{sw} \geq 0.5 \cdot F_b$ . Если продавливающая нагрузка  $F > 2F_b$ , то прочность плиты нельзя обеспечить армированием. В этом случае необходимо увеличить толщину плиты.

### 3. Расчет по СП 52-101-2003

Расчет плиты на продавливание проводится согласно [2], 6.2.46 – 6.2.52. 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  $F_{b,ult} = R_{bt} \cdot u \cdot h_0$ ,  $F_{sw,ult} = 0.8 \cdot q_{sw} \cdot u$ ,  $M_{bx,ult} = R_{bt} \cdot W_x \cdot h_0$ ,  $M_{sw,x,ult} = 0.8 \cdot q_{sw} \cdot W_x$ ,  
 $M_{by,ult} = R_{bt} \cdot W_y \cdot h_0$ ,  $M_{sw,y,ult} = 0.8 \cdot q_{sw} \cdot W_y$ ,  $q_{sw} = \frac{R_{sw} \cdot A_{sw}}{s_w}$ ,  $R_{bt}$  - расчетное сопротивление

бетона при растяжении (с учетом коэффициента условий работы бетона  $\gamma_b$ ),  $h_0 = (h_{0x} + h_{0y}) / 2$  - средняя рабочая высота сечения плиты,  $u$  - 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 (как правило,  $A_{sw}$  определяется для двух хомутов);  $W_x, W_y$  - моменты сопротивления расчетного контура, соответствующие моментам  $M_x, M_y$  и имеющие размерность квадрата единицы длины. При расположении поперечной арматуры, равномерном по расчетному контуру, 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 по расчетному контуру.

Прочность плиты без поперечной арматуры проверяется при  $F_{sw,ult} = 0$ ,  $M_{sw,x,ult} = 0$ ,  $M_{sw,y,ult} = 0$ . Если прочность не обеспечена, то, в случае равномерного расположения арматуры, определяется погонная площадь поперечной арматуры  $A_{sw} / s_w$ , требуемая для выполнения условия прочности и дополнительного условия  $F_{sw,ult} \geq 0.25 \cdot F_{b,ult}$ . При этом знаменатели трех дробей в условии прочности ограничиваются значениями  $2F_{b,ult}$ ,  $2M_{bx,ult}$ ,  $2M_{by,ult}$ . Если удовлетворение условия прочности плиты при указанных ограничениях невозможно, то необходимо увеличить толщину плиты. Согласно указаниям 6.2.46 учитывается ограничение:

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

При крестообразном расположении арматуры среди всевозможных вариантов размещения хомутов, для которых выполняется условие проверки, отыскивается вариант с наименьшим числом хомутов. При проведении проверки, длины  $L_{sw,x}$  и  $L_{sw,y}$  принимаются равными расстояниям между осями крайних хомутов согласно [2], рис.6.12. 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.6.12.

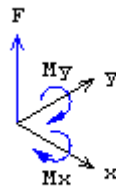
Предусмотрена возможность проверки по предельному напряжению согласно условию:

$$\frac{\max|\tau|}{R_{bt} + 0.8 \frac{R_{sw} A_{sw}}{s_w h_0}} \leq 1$$

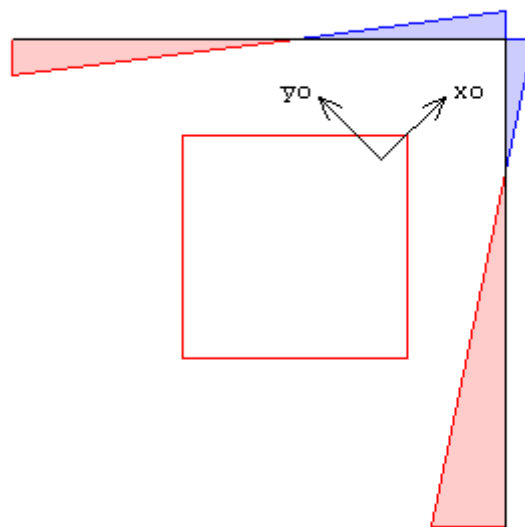
где  $\max|\tau|$  - наибольшее абсолютное значение напряжения  $\tau$  в расчетном поперечном сечении плиты. Данное условие получается путем преобразования исходного условия проверки с использованием выражений для предельных усилий. Ограничение вклада моментов принимает вид:

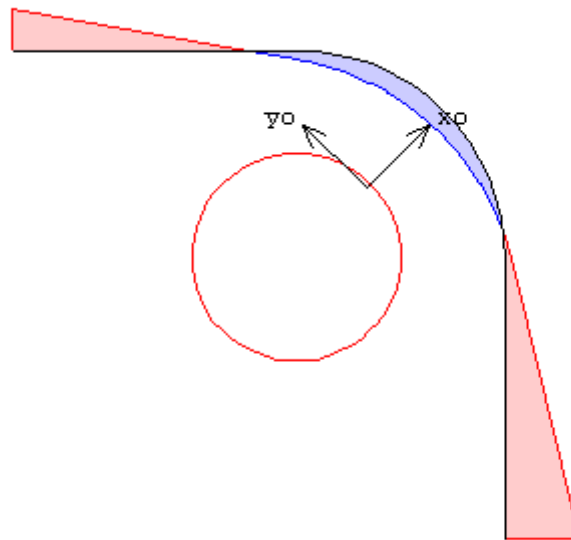
$$\max|\tau| \leq 2\tau_F$$

где  $\tau_F = \frac{F}{uh_0}$  - напряжение от действия силы  $F$ . Напряжение  $\tau$  определяется из уравнений равновесия в предположении линейного распределения. При этом сила  $F$  автоматически принимается положительной при расчете плиты перекрытия и отрицательной при расчете фундаментной плиты. Положительные направления моментов принимаются в соответствии с правилом правого винта:



Ниже приведены примеры распределения напряжения  $\tau$  вдоль расчетного контура в случае угловой колонны прямоугольного и круглого сечения. Оси  $x_0, y_0$  являются главными центральными осями расчетного контура.





#### 4. Расчет по СНБ 5.03.01-02

Расчет плиты на продавливание проводится согласно [3], 7.4.3.1 - 7.4.3.12 с учетом [4]. Условие прочности плиты, армированной хомутами, имеет вид:

$$v_{Sd} \leq v_{Rd, sy}$$

$$v_{Sd} = \frac{\beta \cdot F}{u}$$

$$v_{Rd, sy} = v_{Rd, c} + \frac{A_{sw} \cdot f_{ywd}}{u} \text{ для первого периметра}$$

$$v_{Rd, sy} = v_{Rd, c} + \frac{A_{sw} \cdot f_{ywd} \cdot d}{u \cdot s_w} \text{ для последующих периметров}$$

$$v_{Rd, c} = 0.15 \cdot k \cdot (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} \cdot d \geq 0.5 \cdot f_{ctd} \cdot d$$

Здесь  $\beta$  - коэффициент, учитывающий действие моментов ( $1 \leq \beta \leq 1.5$ ),  $u$  - периметр криволинейного расчетного контура,  $d = (d_x + d_y) / 2$  - средняя рабочая высота сечения плиты,  $s_w$  - шаг хомутов (расстояние между расчетными контурами),  $A_{sw}$  - суммарная площадь сечений хомутов, размещенных по расчетному контуру;  $k = 1 + \sqrt{20/d} \leq 2$  ( $[d] = \text{см}$ ),  $\rho_l = \sqrt{\rho_{lx} \cdot \rho_{ly}} \leq 0.02$  - среднее значение коэффициента продольного армирования,  $f_{ck}$  - нормативное сопротивление бетона при сжатии,  $f_{ctd} = \frac{f_{ctk}}{\gamma_c}$  - расчетное сопротивление бетона при растяжении,  $f_{ctk}$  - нормативное сопротивление бетона при растяжении,  $\gamma_c$  - коэффициент безопасности для бетона,  $f_{ywd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \gamma_{s1}$  - расчетное сопротивление поперечной арматуры ( $\gamma_{s1} = 0.8$ ),  $f_{yk}$  - нормативное сопротивление поперечной арматуры,  $\gamma_s$  - коэффициент безопасности для арматуры. При определении расчетного сопротивления поперечной арматуры коэффициент условий работы  $\gamma_{s2}$  не учитывается. Площадь арматуры  $A_{sw}$  должна

удовлетворять условию  $\frac{A_{sw}}{s_w \cdot u} \geq 0.16 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}}$ , где  $f_{ctm}$  - прочность бетона при растяжении, установленная для проектирования конструкций.

Для внешнего контура, удаленного от последнего расчетного контура на расстояние  $1.5d$ , проверяется следующее условие прочности:

$$v_{Sd} \leq 0.75v_{Rd,c}$$

Если не выполняется условие (7.161) или (7.162), то прочность плиты нельзя обеспечить армированием. В этом случае необходимо увеличить толщину плиты.

## 5. Расчет по EC2

Расчет плиты на продавливание проводится согласно [5] 6.4, и заключается в проверке прочности по краю колонны и по основному контрольному контуру, расположенному на расстоянии  $2d$  от колонны, где  $d = (d_x + d_y) / 2$  - средняя рабочая высота сечения плиты.

Условие прочности плиты без поперечной арматуры имеет вид:

$$v_{Ed} \leq v_{Rd,c}$$

$$v_{Ed} = \beta \frac{V_{Ed}}{u_1 d}$$

$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} \geq v_{\min}$$

$$v_{\min} = 0.035 k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$$

Здесь  $V_{Ed}$  - расчетная продавливающая сила,  $\beta$  - коэффициент учета моментов,  $u_1$  - периметр основного контрольного контура,  $C_{Rd,c} = 0.18 / \gamma_c$ ,  $\gamma_c$  - коэффициент безопасности для бетона, зависящий от вида расчетной комбинации воздействий,  $k = 1 + \sqrt{20/d} \leq 2$  ( $[d] = \text{см}$ ),  $\rho_l = \sqrt{\rho_{lx} \cdot \rho_{ly}} \leq 0.02$  - среднее значение коэффициента продольного армирования,  $f_{ck}$  - прочность бетона при сжатии.

Условие прочности плиты, армированной хомутами, имеет вид:

$$v_{Ed} \leq v_{Rd,cs}$$

$$v_{Rd,cs} = 0.75v_{Rd,c} + 1.5(d/s_r)A_{sw}f_{ywd,ef}/(u_1 d)$$

Здесь  $A_{sw} = n_t \cdot A_s$  - площадь  $n_t$  хомутов, расположенных вдоль контура,  $A_s$  - площадь сечения одного хомута,  $s_r$  - радиальный шаг хомутов,  $f_{ywd,ef} = 250 + 0.25d \leq f_{ywd}$ ,  $f_{ywd} = f_{yk} / \gamma_s$  - расчетный предел текучести арматуры,  $\gamma_s$  - коэффициент безопасности для арматуры, зависящий от вида расчетной комбинации воздействий.

Наряду с проверкой по основному контрольному контуру, проводится проверка по условию:

$$v_{Ed,red} \leq v_{Rd,max}$$

$$v_{Ed,red} = \beta \frac{V_{Ed}}{u_0 d}$$

$$v_{Rd,max} = 0.5v_{cd}$$

$$v = 0.6(1 - f_{ck} / 250)$$

Здесь  $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c$  - расчетная прочность бетона. Периметр  $u_0$  в случае средней колонны равен периметру сечения колонны. Для краевой колонны и угловой колонны прямоугольного сечения значение  $u_0$  вычисляется по формулам:

$$u_0 = c_2 + 3d \leq c_2 + 2c_1$$

$$u_0 = 3d \leq c_1 + c_2$$

Здесь  $c_1$  - длина стороны, перпендикулярной к краю плиты,  $c_2$  - длина стороны, параллельной краю плиты. Для краевой колонны круглого сечения значение  $u_0$  вычисляется по формулам:

$$u_0 = D \cdot \arccos(1 - 1.5d / R) \text{ при } 1.5d < R$$

$$u_0 = \pi D / 2 + 2a \text{ при } 1.5d \geq R$$

$$a = 1.5d - R \leq R$$

Здесь  $D$  - диаметр сечения колонны,  $R = D / 2$ . Для угловой колонны круглого сечения значение  $u_0$  вычисляется по формулам:

$$u_0 = D \cdot \arccos\{1 / \sqrt{2} [1 / \sqrt{2} + \sqrt{1 - (1 / \sqrt{2} - 1.5d / R)^2} - 1.5d / R]\} \text{ при } 1.5d < R / \sqrt{2}.$$

$$u_0 = \pi D / 4 + 2a \text{ при } 1.5d \geq R / \sqrt{2}$$

$$a = 1.5d - R / \sqrt{2} \leq R$$

При расчете фундаментной плиты учитывается отпор грунта в пределах площади, ограниченной основным контрольным контуром. В случае краевой или угловой колонны определяются координаты  $x_p, y_p$  точки приложения равнодействующей  $P$  реактивного давления грунта, и сила  $P$  переносится в начало координат с добавлением моментов  $M_{Px}, M_{Py}$ .

В случае краевой или угловой колонны, основной контрольный контур является незамкнутым и характеризуется центром тяжести с координатами  $x_c, y_c$ . В этом случае, производится переход к центральным осям, параллельным исходным осям  $x, y$ . При расчете с учетом знаков моментов, заданные моменты  $M_x, M_y$  и дополнительные моменты, обусловленные переносом продавливающей силы  $F$ , суммируются с учетом знаков. Если расчет проводится без учета знаков моментов, то суммируются абсолютные значения заданных моментов и дополнительных моментов.

Коэффициент  $\beta$ , учитывающий моменты, определяется на основе распределения поперечных усилий, которое характеризуется одинаковым абсолютным значением. Основное контрольное сечение разбивается на две части: часть с положительными и часть с отрицательными значениями усилий. Пример распределения поперечных усилий в случае средней колонны показан на рис.6.19 [5].

Формула для определения коэффициента  $\beta$  имеет вид:

$$\beta = 1 + k \frac{M_{Ed}}{V_{Ed}} \cdot \frac{u_1}{W_1}$$

Здесь  $k$  - коэффициент по таблице 6.1,  $W_1$  - момент сопротивления, соответствующий принятому распределению поперечных усилий.

В случае средней колонны прямоугольного сечения со сторонами  $c_1, c_2$ , при действии момента в плоскости, параллельной стороне  $c_1$ , момент сопротивления вычисляется по формуле:

$$W_1 = c_1^2 / 2 + c_1 c_2 + 4c_2 d + 16d^2 + 2\pi d c_1$$

Заменой  $c_1$  на  $c_2$  и, наоборот, получается формула для случая действия момента в плоскости, параллельной стороне  $c_2$ .

При действии двух моментов допускается применение приближенной формулы (6.43) [5]:

$$\beta = 1 + 1.8 \sqrt{\left(\frac{e_x}{b_y}\right)^2 + \left(\frac{e_y}{b_x}\right)^2}$$

Здесь  $b_x = c_x + 2d$ ,  $b_y = c_y + 2d$  - размеры основного контрольного контура;  $c_x, c_y$  - длины сторон сечения колонны вдоль осей  $x, y$ ;  $e_x = M_y / F$ ,  $e_y = M_x / F$  - эксцентриситеты;  $M_x, M_y$  - расчетные моменты относительно осей  $x, y$ .

В случае средней колонны круглого сечения, коэффициент учета моментов вычисляется по формуле:

$$\beta = 1 + 0.6\pi \frac{e}{D + 4d}$$

где  $e = \sqrt{M_x^2 + M_y^2} / F$ .

В случае краевой или угловой колонны, коэффициент  $\beta$  определяется численным методом путем отыскания такого распределения поперечных усилий, для которого выполняются условия равновесия при действии расчетных моментов  $k_x M_{x0}$  и  $k_y M_{y0}$ . Коэффициенты  $k_x, k_y$  принимаются по таблице 6.1. В случае угловой колонны, при действии двух расчетных моментов, дополнительно вычисляется значение  $\beta$  после изменения знака одного из расчетных моментов. Из полученных двух значений выбирается наибольшее.

В программе предусмотрен графический вывод основного контрольного контура с изображением нейтральной линии, отделяющей зоны контура с положительным и отрицательным знаками поперечных усилий. Следует заметить, что для средней колонны прямоугольного сечения, при действии двух моментов, значение коэффициента  $\beta$ , определенное численным методом, меньше значений, получаемых по формуле (6.43).

В программе предусмотрена возможность ввода значений коэффициента  $\beta$ , равных 1.15 для средней колонны, 1.4 для краевой колонны, 1.5 для угловой колонны. Согласно 6.4.3 (6), эти значения могут применяться при расчете конструкций, в которых примыкающие пролеты различаются по длине не более, чем на 25%.

Если условие прочности плиты без поперечной арматуры не выполняется, то определяется требуемая площадь арматуры и производится конструирование арматуры с учетом конструктивных требований по пункту 9.4.3. При этом поперечная арматура размещается в пределах контура с периметром  $u_{out}$ , для которого выполняется условие:

$$\beta \frac{V_{Ed}}{u_{out} d} = v_{Rd,c}$$

Наибольшее расстояние от этого контура до арматуры не должно превышать  $1.5d$ . При конструировании учитывается значение минимальной площади арматуры, вычисляемое по формуле:

$$A_{sw,min} = A_s n_t = \frac{0.008}{1.5} \sqrt{f_{ck} / f_{ywk}} s_r s_t n_t$$

При этом в качестве тангенциального шага хомутов  $s_t$  принимается шаг  $s_{t,max}$  для внешнего ряда хомутов.

Если не выполняется условие  $v_{Ed,red} \leq v_{Rd,max}$ , то для заданной продавливающей нагрузки нельзя обеспечить прочность плиты армированием.

## 6. Конструирование арматуры

При конструировании поперечной арматуры учитываются конструктивные требования норм, относящиеся к шагу хомутов  $s_w$ , расстоянию между колонной и ближайшими к ней хомутами, размеру зоны армирования.

В случае колонны прямоугольного сечения, при расчете по [1], рассматривается равномерное расположение арматуры. При расчете по [2], рассматривается как равномерное, так и крестообразное расположение арматуры. При равномерном расположении арматуры, шаги хомутов вдоль расчетного контура и перпендикулярно к нему принимаются одинаковыми. Хомуты размещаются по всей зоне продавливания. При крестообразном расположении арматуры шаги хомутов различны. Хомуты размещаются сосредоточенно у осей сечения колонны.

В случае круглой колонны, хомуты устанавливаются по направлениям, перпендикулярным к расчетному контуру.

Согласно [1] 5.29, шаг хомутов должен удовлетворять следующим условиям:

$$s_w \leq h/3, \quad s_w \leq 20 \text{ см}$$

Размер зоны армирования должен быть не меньше  $1.5h$  ( $h$  - толщина плиты).

Согласно [2], шаг хомутов должен удовлетворять следующим условиям:

$$s_w \leq h_0/3, \quad s_w \leq 30 \text{ см}$$

Расстояние между колонной и ближайшими к ней хомутами должно быть не меньше  $h_0/3$  и не больше  $h_0/2$ . Размер зоны армирования должен быть не меньше  $1.5h_0$  ( $h_0$  - средняя рабочая высота сечения плиты).

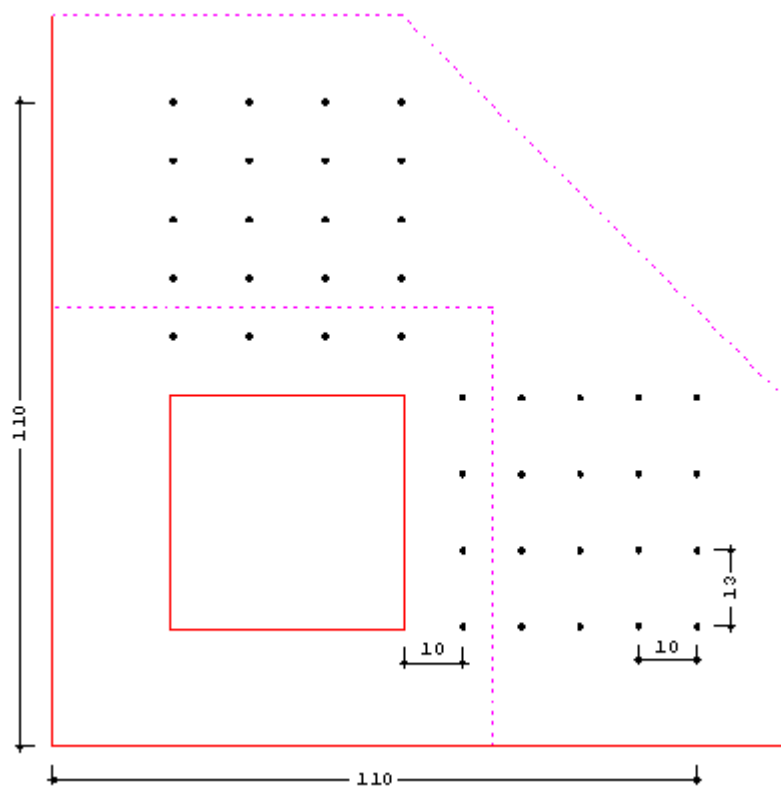
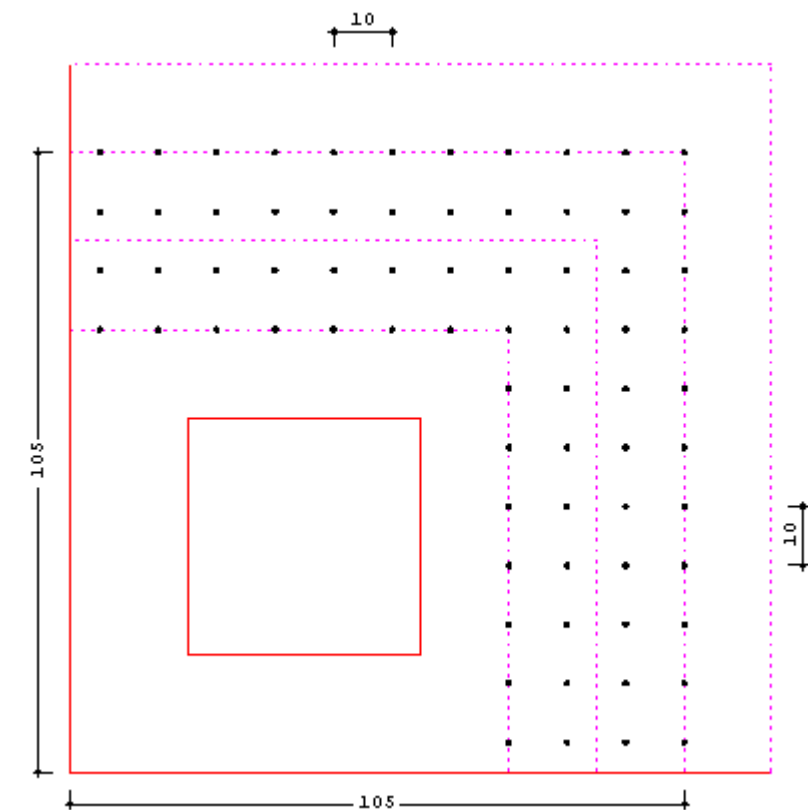
В соответствии с [1], 3.42 и [2], 6.2.48, производится дополнительный расчет на продавливание для зоны плиты, находящейся за пределами области армирования.

При расчете согласно [3], количество расчетных контуров и шаг хомутов ( $s_w \leq 0.75d$ ) подбираются по условию минимума общего числа хомутов. Хомуты размещаются равномерно вдоль расчетных контуров.

При расчете согласно [5], под рядом хомутов понимаются хомуты, расположенные вдоль одного контура. При конструировании должны учитываться следующие требования: 1) арматура должна быть выполнена из двух и более рядов хомутов, 2) радиальный шаг хомутов  $s_r$  не должен превышать  $0.75d$ , 3) тангенциальный шаг хомутов  $s_t$  не должен превышать  $1.5d$  для рядов, расположенных внутри основного расчетного контура, и не должен превышать  $2d$  для рядов, расположенных снаружи основного расчетного контура, 4) расстояние до первого ряда не должно превышать  $d/2$ . Шаги хомутов  $s_r$  и  $s_t$  подбираются по условию минимума общего числа хомутов. В каждом ряду хомуты размещаются равномерно.

По результатам конструирования арматуры выводится картина размещения хомутов.

Ниже приведены примеры равномерного и крестообразного размещения хомутов в случае угловой колонны прямоугольного сечения.

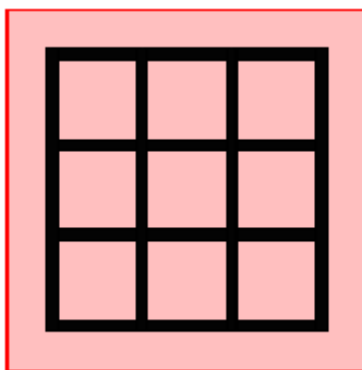




## Литература

1. СНиП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 80 с.
2. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры / ГУП «НИИЖБ», ФГУП ЦПП. – М., 2004.
3. СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2003. – 139 с.
4. Бетонные и железобетонные конструкции (Изменение №1 СНБ 5.03.-01-02)/ Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2004.
5. ТКП EN 1992-1-1: Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций – Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий.

## 445 – Расчет на местное сжатие



Программа предназначена для расчёта на местное сжатие (смятие) согласно следующим нормам: СНиП 2.03.01-84\* [1], СП 52-101-2003 [2], СНБ 5.03.01-02 [3] и [4]. Предусмотрен учет влияния краев элемента. Если прочность элемента без косвенной арматуры не обеспечена, то производится подбор сеток косвенной арматуры и их размещение.

## 1. Расчет по СНиП 2.03.01-84\*

Расчет на местное сжатие проводится согласно [1], 3.39 – 3.41. Условие прочности элемента без косвенной арматуры имеет вид:

$$\frac{N}{N_b} \leq 1$$

Здесь  $N_b = \psi R_{b,loc} c_x c_y$  - предельное значение сжимающей силы при отсутствии косвенной арматуры,  $\psi$  - коэффициент учета неравномерности распределения местной нагрузки;  $c_x, c_y$  - размеры грузовой площади по направлениям  $x, y$ ;  $R_{b,loc} = \alpha \varphi_b R_b$ ,  $\alpha$  - коэффициент, равный 1 для бетона класса ниже В25 и равный  $13.5 R_{bt} / R_b$  для бетона класса В25 и выше,  $\varphi_b = \sqrt[3]{A_{loc2} / c_x c_y} \leq 2.5$ ,  $\alpha \varphi_b \geq 1$ ;  $R_b, R_{bt}$  - расчетные сопротивления бетона при сжатии и растяжении (с учетом коэффициента условий работы  $\gamma_b$ ),  $A_{loc2}$  - расчетная площадь смятия. Центры тяжести грузовой площади  $c_x c_y$  и расчетной площади  $A_{loc2}$  совпадают. Если грузовая площадь расположена вдали от краев элемента, то  $A_{loc2} = (c_x + 2c_y)(c_y + 2c_x)$ . Если расстояние  $a_x$  от стороны  $c_x$  до края, параллельного этой стороне, меньше  $c_x$ , то  $A_{loc2} = (c_x + 2c_y)(c_y + 2a_x)$ . При  $a_x < c_x$  и  $a_y < c_y$  расчетная площадь равна  $A_{loc2} = (c_x + 2a_x)(c_y + 2a_y)$ . При  $a_x = 0$  и  $a_y = 0$  грузовая и расчетная площади равны, т.е.  $A_{loc2} = c_x c_y$ .

Условие прочности элемента из тяжелого бетона с косвенной арматурой имеет вид:

$$\frac{N}{N_{bs}} \leq 1$$

Здесь  $N_{bs} = \varphi_b R_b c_x c_y + \varphi \mu_{xy} R_{s,xy} \varphi_s A_{loc1}$  - предельное значение сжимающей силы при наличии косвенной арматуры,  $R_{s,xy}$  - расчетное сопротивление арматуры сеток,  $\varphi = 1 / (0.23 + \Psi)$ ,  $\Psi = \mu_{xy} R_{s,xy} / (R_b + 10)$ ,  $\mu_{xy} = (n_x l_x + n_y l_y) A_s / l_x l_y s$  - коэффициент косвенного армирования;  $l_x, l_y$  - длины стержней, параллельных направлениям  $x, y$ ;  $n_x, n_y$  - числа стержней,  $A_s$  - площадь сечения одного стержня,  $s$  - шаг сеток косвенной арматуры,  $\varphi_s = 4.5 - 3.5 A_{loc1} / A_{ef}$ ,  $A_{loc1}$  - грузовая площадь за вычетом той ее части, которая находится за пределами площади сетки,  $A_{ef}$  - площадь сетки за вычетом той ее части, которая находится за пределами расчетной площади  $A_{loc2}$ .

Площадь сетки  $A_{xy}$  определяется как площадь внутри контура, образованного осями крайних стержней сетки. Область, в пределах которой располагается сетка, строится так же, как и расчетная область. При расположении грузовой площади вдали от краев элемента, сетка располагается в пределах расчетной области. При наличии близкорасположенного края, расчетная область меньше площади сетки. Часть площади сетки, находящаяся вне расчетной области, не учитывается при определении предельного значения сжимающей силы.

На рис.1 грузовая площадь совпадает с сечением элемента. В этом случае  $A_{loc2} = c_x c_y$ ,  $A_{ef} = A_{xy}$ , причем  $A_{xy} < A_{loc2}$ . Площадь  $A_{loc1}$  меньше грузовой площади  $c_x c_y$  на ту ее часть, которая находится за пределами площади сетки  $A_{xy}$ .

На рис.2 грузовая площадь находится в углу элемента. В этом случае,  $A_{loc2} = c_x c_y$ ,  $A_{ef} < A_{xy}$ , причем  $A_{xy} > A_{loc2}$ . Площадь  $A_{loc1}$  меньше грузовой площади  $c_x c_y$  на ту ее часть, которая находится за пределами площади сетки. Площадь  $A_{ef}$  меньше площади сетки  $A_{xy}$  на ту ее часть, которая находится за пределами расчетной области  $A_{loc2}$ .

На рис.3 грузовая площадь находится на небольшом удалении от краев. При этом  $A_{loc2} > c_x c_y$ ,  $A_{ef} < A_{s,xy}$ ,  $A_{loc1} = c_x c_y$ . Площадь  $A_{ef}$  меньше площади сетки  $A_{s,xy}$  на ту ее часть, которая находится за пределами расчетной области  $A_{loc2}$ .

На рис.4 грузовая площадь находится вдали от краев элемента. В этом случае,  $A_{loc2} > c_x c_y$ ,  $A_{ef} = A_{xy}$ ,  $A_{xy} \approx A_{loc2}$  (причем  $A_{xy}$  не более  $A_{loc2}$ ),  $A_{loc1} = c_x c_y$ .

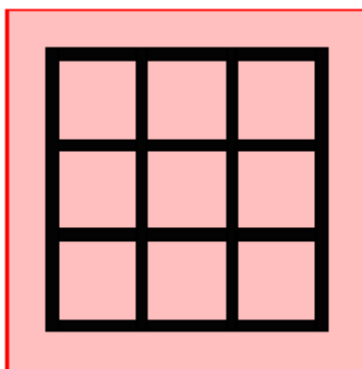


Рис.1

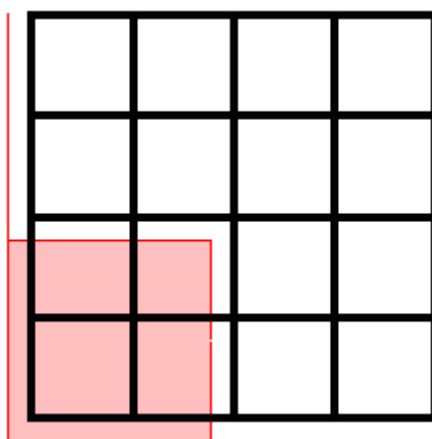


Рис.2

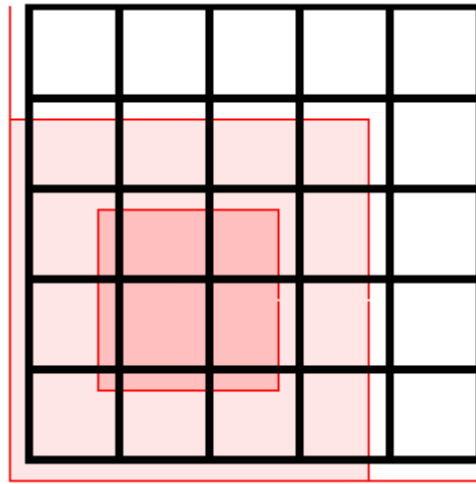


Рис.3

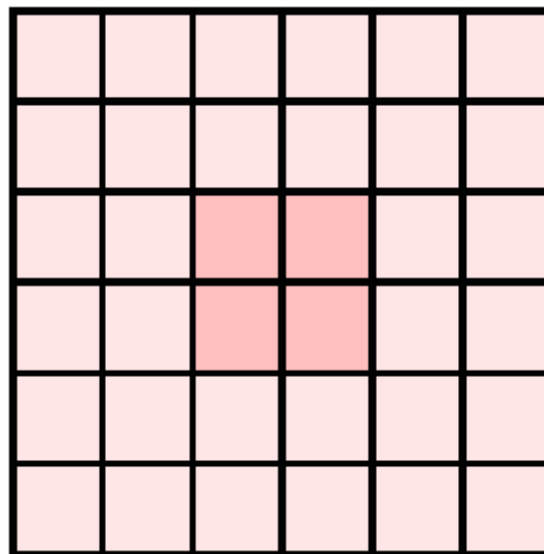


Рис.4

## 2. Расчет по СП 52-101-2003

Расчет на местное сжатие проводится согласно [2], 6.2.43 – 6.2.45. Условие прочности элемента без косвенной арматуры имеет вид:

$$\frac{N}{N_b} \leq 1$$

Здесь  $N_b = \psi R_{b,loc} c_x c_y$  - предельное значение сжимающей силы при отсутствии косвенной арматуры,  $\psi$  - коэффициент учета неравномерности распределения местной нагрузки;  $c_x, c_y$  - размеры грузовой площади по направлениям  $x, y$ ;  $R_{b,loc} = \varphi_b R_b$ ,  $\varphi_b = 0.8 \sqrt{A_{b,max} / c_x c_y} \leq 2.5$ , причем  $\varphi_b \geq 1$ ,  $R_b$  - расчетное сопротивление бетона при сжатии (с учетом коэффициента условий работы  $\gamma_b$ ),  $A_{b,max}$  - расчетная площадь смятия. Центры тяжести грузовой площади  $c_x c_y$  и расчетной площади  $A_{b,max}$  совпадают. Если грузовая площадь расположена вдали от краев элемента, то  $A_{b,max} = (c_x + 2c_y)(c_y + 2c_x)$ . Если расстояние  $a_x$  от стороны  $c_x$  до края, параллельного этой стороне, меньше  $c_x$ , то  $A_{b,max} = (c_x + 2c_y)(c_y + 2a_x)$ . При  $a_x < c_x$  и  $a_y < c_y$

расчетная площадь равна  $A_{b,\max} = (c_x + 2a_y)(c_y + 2a_x)$ . При  $a_x = 0$  и  $a_y = 0$  грузовая и расчетная площади равны, т.е.  $A_{b,\max} = c_x c_y$ .

Условие прочности элемента из тяжелого бетона с косвенной арматурой имеет вид:

$$\frac{N}{N_{bs}} \leq 1$$

Здесь  $N_{bs} = N_b + N_s$  - предельное значение сжимающей силы при наличии косвенной арматуры,  $N_b$  - предельное значение силы при отсутствии косвенной арматуры,  $N_s = 2\psi\varphi_{s,xy}R_{s,xy}\mu_{s,xy}A_{b,loc}$ ,  $R_{s,xy}$  - расчетное сопротивление арматуры сеток,  $\varphi_{s,xy} = \sqrt{A_{b,loc,ef}/A_{b,loc}}$ ,  $\mu_{s,xy} = (n_x l_x + n_y l_y)A_s / l_x l_y s$  - коэффициент косвенного армирования;  $l_x, l_y$  - длины стержней, параллельных направлениям  $x, y$ ;  $n_x, n_y$  - числа стержней,  $A_s$  - площадь сечения одного стержня,  $s$  - шаг сеток косвенной арматуры,  $A_{b,loc}$  - грузовая площадь за вычетом той ее части, которая находится за пределами площади сетки,  $A_{b,loc,ef}$  - площадь сетки за вычетом той ее части, которая находится за пределами расчетной площади  $A_{b,\max}$ .

При проверке условия прочности учитывается ограничение  $N_{bs} \leq 2N_b$ . При  $N > 2N_b$  прочность элемента невозможно обеспечить при помощи косвенного армирования.

Некоторые случаи расположения грузовой площади относительно краев элемента и расположения сетки относительно грузовой площади рассмотрены в разделе 1.

### 3. Расчет по СНБ 5.03.01-02

Расчет на местное сжатие проводится согласно [3], 7.4.1. Условие прочности элемента без косвенной арматуры имеет вид:

$$\frac{N}{N_b} \leq 1$$

Здесь  $N_b = \alpha_u f_{cud} c_x c_y$  - предельное значение сжимающей силы при отсутствии косвенной арматуры,  $\alpha_u$  - коэффициент учета неравномерности распределения местной нагрузки;  $c_x, c_y$  - размеры грузовой площади по направлениям  $x, y$ ;  $f_{cud} = \omega_u \alpha f_{cd}$ ,  $\omega_u = 1 + k_u k_f \frac{f_{ctd}}{f_{cd}} (\sqrt{A_{c1}/c_x c_y} - 1) \leq 3$ ;  $f_{cd}, f_{ctd}$  - расчетные сопротивления бетона при сжатии и растяжении,  $A_{c1}$  - расчетная площадь смятия. Центры тяжести грузовой площади  $c_x c_y$  и расчетной площади  $A_{c1}$  совпадают. Если грузовая площадь расположена вдали от краев элемента, то  $A_{c1} = (c_x + 2c_y)(c_y + 2c_x)$ . Если расстояние  $a_x$  от стороны  $c_x$  до края, параллельного этой стороне, меньше  $c_x$ , то  $A_{c1} = (c_x + 2c_y)(c_y + 2a_x)$ . При  $a_x < c_x$  и  $a_y < c_y$  расчетная площадь равна  $A_{c1} = (c_x + 2a_y)(c_y + 2a_x)$ . При  $a_x = 0$  и  $a_y = 0$  грузовая и расчетная площади равны, т.е.  $A_{c1} = c_x c_y$ .

Условие прочности элемента из тяжелого бетона с косвенной арматурой имеет вид:

$$\frac{N}{N_{bs}} \leq 1$$

Здесь  $N_{bs} = N_b + N_s$  - предельное значение сжимающей силы при наличии косвенной арматуры,  $N_b$  - предельное значение силы при отсутствии косвенной арматуры,  $N_s = \alpha_u \varphi_0 \rho_{xy} f_{yd,xy} \varphi_s A_{c0}$ ,  $f_{yd,xy}$  - расчетное сопротивление арматуры сеток,  $\varphi_0 = 1/(0.23 + \Psi)$ ,  $\Psi = \rho_{xy} f_{yd,xy} / (\alpha f_{cd} + 10)$ ,  $\rho_{xy} = (n_x l_x + n_y l_y) A_s / l_x l_y s$  - коэффициент косвенного армирования;  $l_x, l_y$  - длины стержней, параллельных направлениям  $x, y$ ;  $n_x, n_y$  - числа стержней,  $A_s$  - площадь сечения одного стержня,  $s$  - шаг сеток косвенной арматуры,  $\varphi_s = 4.5 - 3.5 A_{c0} / A_{eff}$ ,  $A_{c0}$  - грузовая площадь за вычетом той ее части, которая находится за пределами площади сетки,  $A_{eff}$  - площадь сетки за вычетом той ее части, которая находится за пределами расчетной площади  $A_{c1}$ .

При проверке условия прочности учитывается ограничение  $N_{bs} \leq 2N_b$ . При  $N > 2N_b$  прочность элемента невозможно обеспечить при помощи косвенного армирования.

Некоторые случаи расположения грузовой площади относительно краев элемента и расположения сетки относительно грузовой площади рассмотрены в разделе 1.

#### 4. Конструирование арматуры

Параметрами, применяемыми при подборе сеток косвенной арматуры, являются следующие параметры: диаметр арматуры  $d_s$ , минимальная толщина защитного слоя бетона  $a_{\min}$ , минимальное и максимальное значения шага стержней сетки  $s_0$ , минимальное и максимальное значения шага сеток  $s$ , глубина зоны армирования  $h_s$ . Шаг  $s_0$  принимается одинаковым по направлениям  $x, y$ .

Значение  $a_{\min}$  применяется при размещении сеток вблизи краев, а также при определении положения сеток по толщине элемента  $h$ . Глубина зоны армирования  $h_s$  определяется как расстояние от нагруженной поверхности элемента до граничной плоскости крайней сетки. Крайняя сетка располагается так, чтобы расстояние от ненагруженной поверхности элемента до стержней сетки было не менее  $a_{\min}$  и не менее  $d_s$ . Наименьшее число сеток косвенной арматуры принимается равным двум.

Согласно [2] 8.3.16, по глубине сетки располагают либо в пределах удвоенного большего размера грузовой площади  $\max(2c_x, 2c_y)$ , либо в пределах толщины элемента. При расчете по [1] и [3] глубина зоны армирования может приниматься согласно [2] или определяться по заданному значению  $h_s$ .

При подборе сеток косвенной арматуры в качестве критерия применяется коэффициент косвенного армирования  $\mu_{xy}$  (в обозначениях [1]). Отыскиваются такие параметры косвенной арматуры, при которых обеспечивается прочность элемента и  $\mu_{xy}$  принимает наименьшее значение.

## Литература

1. СНиП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 80 с.
2. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры / ГУП «НИИЖБ», ФГУП ЦПП. – М., 2004.
3. СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2003. – 139 с.
4. Бетонные и железобетонные конструкции (Изменение №3 СНБ 5.03.-01-02)/ Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2006.



## 450 – Расчет по огнестойкости



Программа предназначена для расчёта по огнестойкости элементов железобетонных конструкций согласно СТО НИИЖБ [1] и Eurocode 2 [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. Нормативные сопротивления материалов при нормальной температуре принимаются согласно СП 52-101-2003 [3]. Предусмотрена возможность задания материалов с ненормированной прочностью.

## 1. Сечения

Рассматриваются стержневые элементы прямоугольного, круглого, уголкового и таврового сечений, а также плиты. Применяются центральные оси координат  $y, z$  бетонного сечения. Для прямоугольного сечения предусмотрены следующие схемы армирования: 1) арматура располагается в углах сечения, 2) арматура располагается вдоль контура сечения, 3) арматура располагается вдоль верхней и нижней сторон сечения, 4) арматура располагается произвольным образом.

Для первой схемы армирования предусмотрены два варианта задания арматуры. Первый вариант предназначен для случая, когда в каждом углу сечения располагается один стержень. В этом случае задается диаметр стержней и толщина защитного слоя бетона. Второй вариант предназначен для случая, когда в каждом углу сечения располагается группа стержней. В этом случае задается общая площадь арматуры и расстояние до центра тяжести группы стержней от ближайших сторон 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.

При третьей схеме армирования, для каждого ряда арматурных стержней задаются: диаметр крайних стержней, диаметр промежуточных стержней, число промежуточных стержней, толщина защитного слоя бетона.

Если фактическое размещение арматурных стержней отличается от вышеуказанных 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, в качестве осей координат, принимаются оси, направленные по нижней и левой сторонам сечения. Задаются число стержней в ряду и диаметр стержней.

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  $z$ . Предполагается, что число стержней не меньше 6.

В плите арматура равномерно распределяется вдоль верхней и нижней сторон. Для каждого ряда арматурных стержней задаются диаметр и шаг стержней, толщина защитного слоя бетона.

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 арматура задается путем ввода рядов стержней.

## 2. Усилия

Расчет по огнестойкости проводится для усилий от наиболее неблагоприятных сочетаний нормативных постоянных и длительных нагрузок согласно СНиП 2.01.07-85\* «Нагрузки и воздействия». Согласно СТО НИИЖБ в том случае, когда нельзя установить значение нормативной нагрузки, следует принимать ее равной 0,7 от расчетной нагрузки.

Продольная сила  $N$  принимается положительной при сжатии. Положительные направления изгибающих моментов  $M_y, M_z$  показаны на рис.1. 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 задаются погонные усилия.

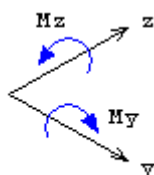


Рис.1. Положительные направления изгибающих моментов

## 3. Расчет по огнестойкости

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

Расчеты по огнестойкости, согласно СТО НИИЖБ и Eurocode 2, не имеют принципиальных различий, но имеют различия в зависимостях от температуры теплофизических, прочностных и деформационных характеристик бетона и арматуры. Также различными являются диаграммы деформирования материалов.

### 3.1 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  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности,  $c$  - удельная теплоемкость,  $\rho$  - плотность материала. При расчете температуры в сечении элемента не учитывается влияние арматуры.

Согласно СТО НИИЖБ, коэффициент теплопроводности бетона в  $[\text{Вт}/(\text{м}^0 \text{C})]$  определяется по следующим формулам:

для бетона на силикатном заполнителе

$$\lambda = 1.2 - 0.00035T$$

для бетона на карбонатном заполнителе

$$\lambda = 1.14 - 0.00055T$$

Удельная теплоемкость бетона в  $[\text{Дж}/(\text{кг}^0 \text{C})]$  на силикатном или карбонатном заполнителе определяется по формуле:

$$c = 710 + 0.83T$$

Согласно Eurocode 2, коэффициент теплопроводности бетона определяется по формуле:

$$\lambda = 1.36 - 0.136(T/100) + 0.0057(T/100)^2$$

Удельная теплоемкость сухого бетона определяется по формулам:

$c = 900$	при $20^0 \text{C} \leq T \leq 100^0 \text{C}$
$c = 900 + (T - 100)$	при $100^0 \text{C} < T \leq 200^0 \text{C}$
$c = 1000 + (T - 200)/2$	при $200^0 \text{C} < T \leq 400^0 \text{C}$
$c = 1100$	при $400^0 \text{C} < T \leq 1200^0 \text{C}$

Согласно Eurocode 2, зависимость удельной теплоемкости от температуры, с учетом влажности бетона, характеризуется пиковым значением при  $115^0 \text{C}$ , равным 1470 и 2020 при влажности 1.5% и 3% соответственно. Плотность бетона зависит от температуры следующим образом:

$\rho = \rho_0$	при $20^0 \text{C} \leq T \leq 115^0 \text{C}$
$\rho = \rho_0(1 - 0.02(T - 115)/85)$	при $115^0 \text{C} < T \leq 200^0 \text{C}$
$\rho = \rho_0(0.98 - 0.03(T - 200)/200)$	при $200^0 \text{C} < T \leq 400^0 \text{C}$
$\rho = \rho_0(0.95 - 0.07(T - 400)/800)$	при $400^0 \text{C} < T \leq 1200^0 \text{C}$

Здесь  $\rho_0$  - плотность бетона при температуре  $20^0 \text{C}$ .

Огневое воздействие характеризуется зависимостью температуры среды от времени, отсчитываемого от начала пожара. Согласно ГОСТ 30247.0-94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования», 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.2.

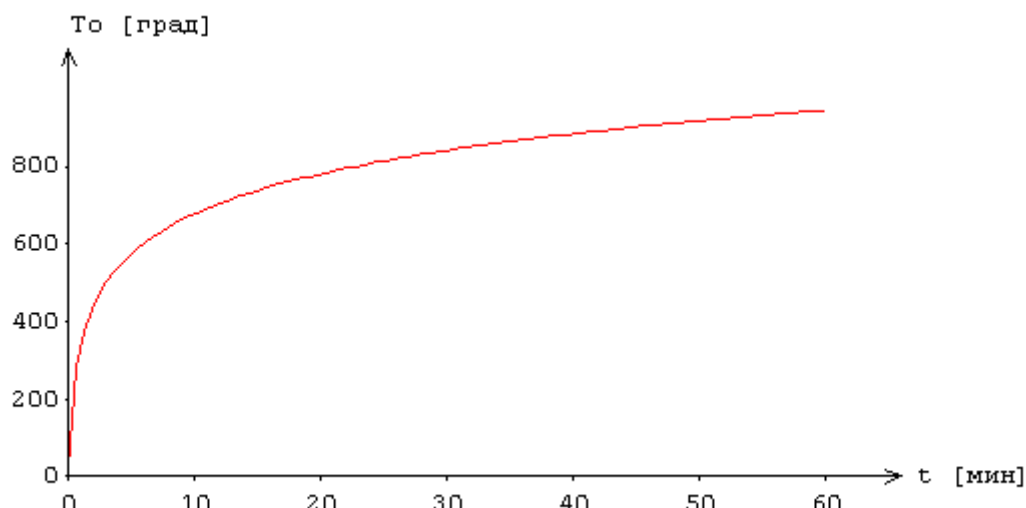


Рис.2. Зависимость температуры среды от времени

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:

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

При решении температурной задачи на нагреваемых сторонах сечения ставится условие равенства теплового потока от контура вглубь сечения и теплового потока к контуру сечения 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. При расчете по СТО НИИЖБ принимается  $\alpha_c = 29 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$ ,  $\varepsilon = 0.56$ , а при расчете по Eurocode 2 -  $\alpha_c = 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$ ,  $\varepsilon = 0.8$ . На ненагреваемых сторонах ставится аналогичное условие при  $\alpha_c = 1.5\sqrt{T-20} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$ ,  $\varepsilon = 0.63$  и  $\alpha_c = 4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$ ,  $\varepsilon = 0.8$  при расчете по СТО НИИЖБ и Eurocode 2 соответственно.

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 снижается 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.3 приведены изотермы, полученные при трехстороннем нагреве квадратного сечения и всестороннем нагреве уголкового сечения.

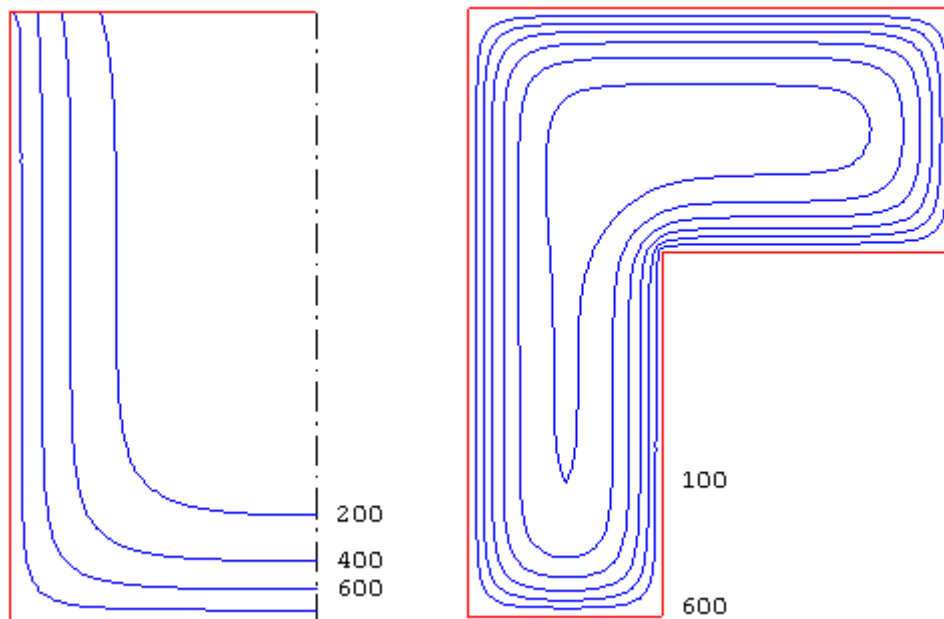


Рис.3. Изотермы

### 3.2 Определение предельных усилий

Предельные усилия при огневом воздействии определяются на основе диаграмм деформирования сжатого бетона и арматуры. При этом учитывается зависимость диаграмм от температуры. Нормативные сопротивления сжатого бетона и арматуры при нормальной температуре принимаются согласно СП 52-101-2003 [3]. Предусмотрена возможность задания материалов с ненормированной прочностью.

На рис.4 приведены диаграммы деформирования сжатого бетона при температуре  $20^{\circ}\text{C}$  и  $500^{\circ}\text{C}$ , построенные по данным СТО НИИЖБ. По оси ординат откладывается напряжение  $\sigma$  [МПа], по оси абсцисс – деформация  $\varepsilon$  [%] ( $1\% = 0.1\% = 0.001$ ). На рис.5 приведены диаграммы, построенные по данным Eurocode 2.

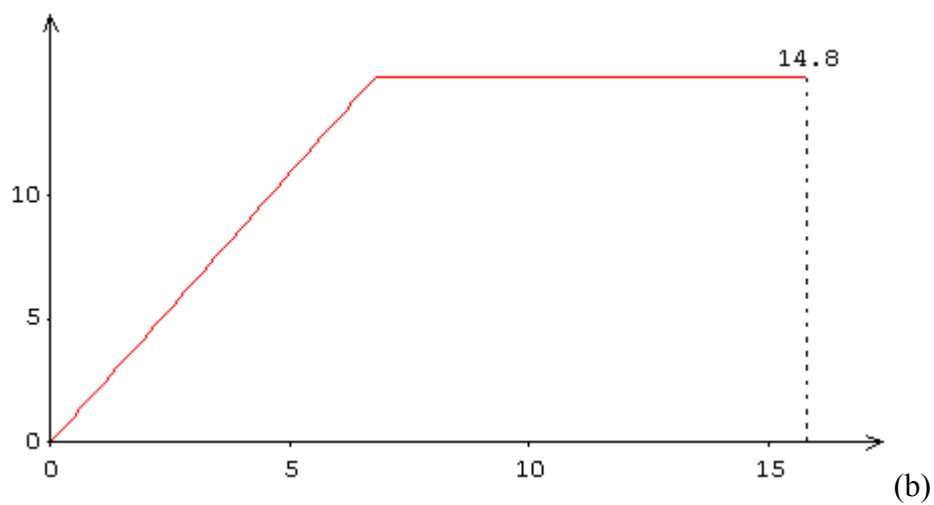
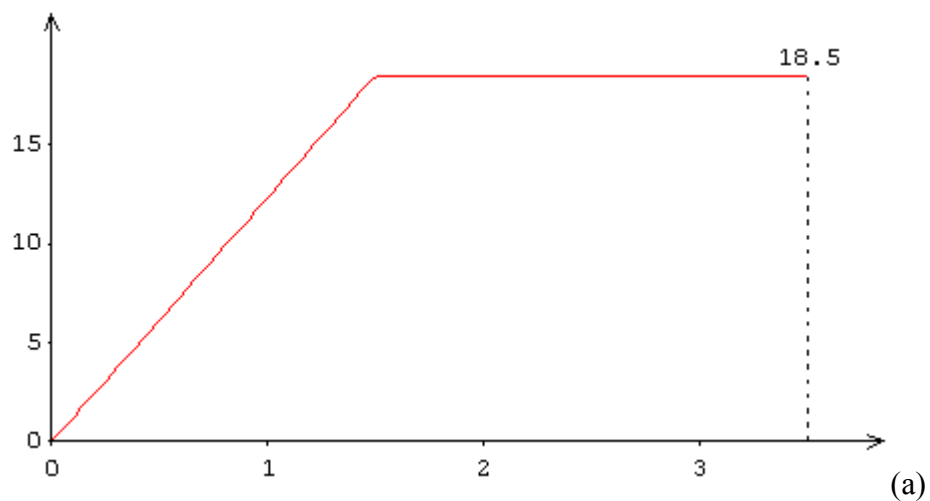
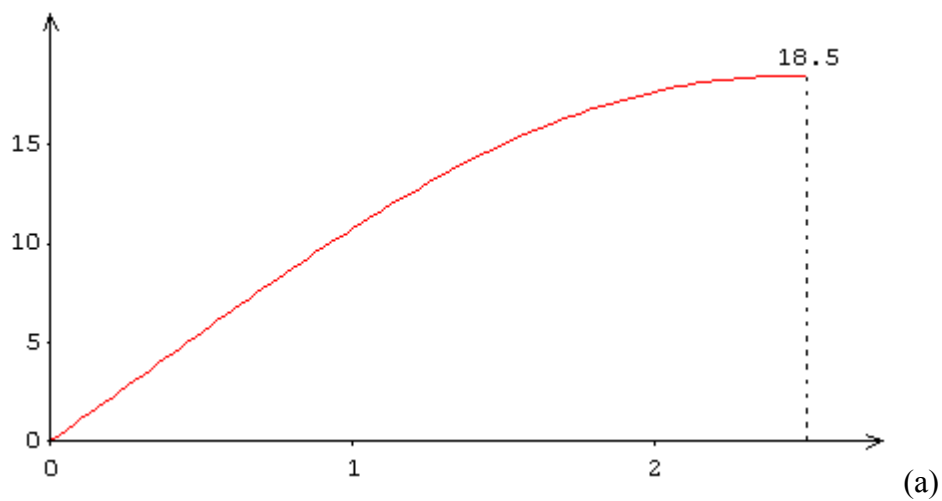


Рис.4. Диаграмма для сжатого бетона согласно СТО НИИЖБ при 20<sup>0</sup>С (а) и 500<sup>0</sup>С (б)



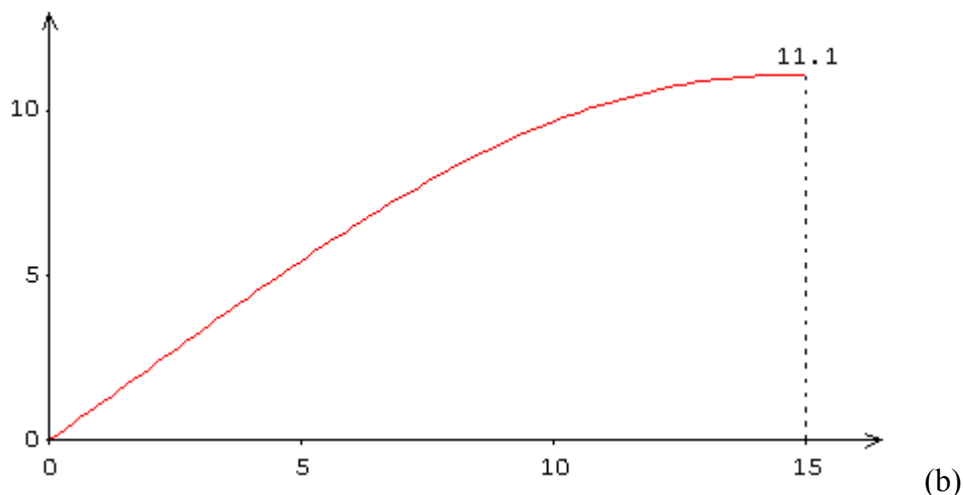


Рис.5. Диаграмма для сжатого бетона согласно Eurocode 2 при  $20^{\circ}\text{C}$  (а) и  $500^{\circ}\text{C}$  (б)

Диаграммы деформирования сжатого бетона согласно СТО НИИЖБ характеризуются нормативным значением сопротивления бетона при повышенной температуре  $R_{bnt}$ , значением деформации  $\varepsilon_{b1}$ , при которой достигается напряжение  $R_{bnt}$ , и значением предельной деформации  $\varepsilon_{b2}$ .

В табл.1 приведены данные для построения диаграмм деформирования сжатого бетона по СТО НИИЖБ. Через  $R_{bn}$  обозначается нормативное сопротивление сжатого бетона при нормальной температуре. Значения  $\frac{R_{bnt}}{R_{bn}}$  даны в СТО НИИЖБ до температуры  $800^{\circ}\text{C}$ , а значения деформаций – до температуры  $500^{\circ}\text{C}$ .

Таблица 1

T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$\frac{R_{bnt}}{R_{bn}}$ (силикатный заполнитель)	$\frac{R_{bnt}}{R_{bn}}$ (карбонатный заполнитель)	$\varepsilon_{b1}$ [‰]	$\varepsilon_{b2}$ [‰]
20	1.00	1.00	1.5	3.5
100	1.00	1.00	1.9	4.4
200	0.98	1.00	2.6	6.1
300	0.95	0.95	3.8	8.8
400	0.85	0.90	4.9	11.4
500	0.80	0.85	6.8	15.8
600	0.60	0.65		
700	0.20	0.30		
800	0.10	0.15		



Диаграммы деформирования сжатого бетона согласно Eurocode 2 строятся по формуле:

$$\sigma = \frac{3\varepsilon f_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta} \left[ 2 + \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)^3 \right]}$$

Здесь  $f_{c,\theta}$  - сопротивление бетона при температуре  $\theta$ ,  $\varepsilon_{c1,\theta}$  - предельная деформация. В табл.2 приведены данные для построения диаграмм деформирования сжатого бетона по Eurocode 2. Через  $f_{ck}$  обозначается характеристическое значение сопротивления сжатого бетона при нормальной температуре. При расчете  $f_{ck}$  принимается равным  $R_{bn}$ .

Таблица 2

Т [°C]	$\frac{f_{c,\theta}}{f_{ck}}$ (гранитный заполнитель)	$\frac{f_{c,\theta}}{f_{ck}}$ (известняковый заполнитель)	$\varepsilon_{c1,\theta}$ [‰]
20	1.00	1.00	2.5
100	1.00	1.00	4.0
200	0.95	0.97	5.5
300	0.85	0.91	7.0
400	0.75	0.85	10.0
500	0.60	0.74	15.0
600	0.45	0.60	25.0
700	0.30	0.43	25.0
800	0.15	0.27	25.0
900	0.08	0.15	25.0
1000	0.04	0.06	25.0
1100	0.01	0.02	25.0

На рис.6 приведены диаграммы деформирования арматуры при температуре 20<sup>0</sup>С и 500<sup>0</sup>С, построенные по данным СТО НИИЖБ. На рис.7 приведены диаграммы, построенные по данным Eurocode 2.

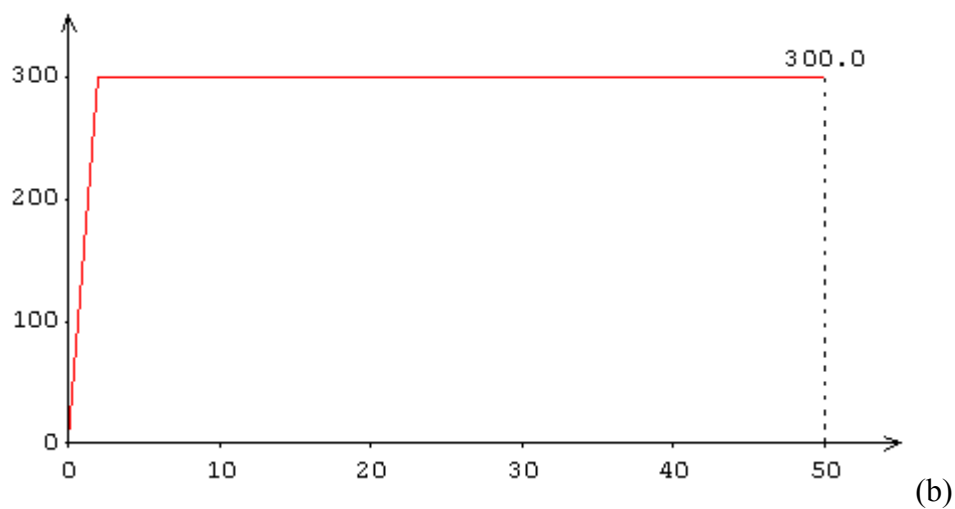
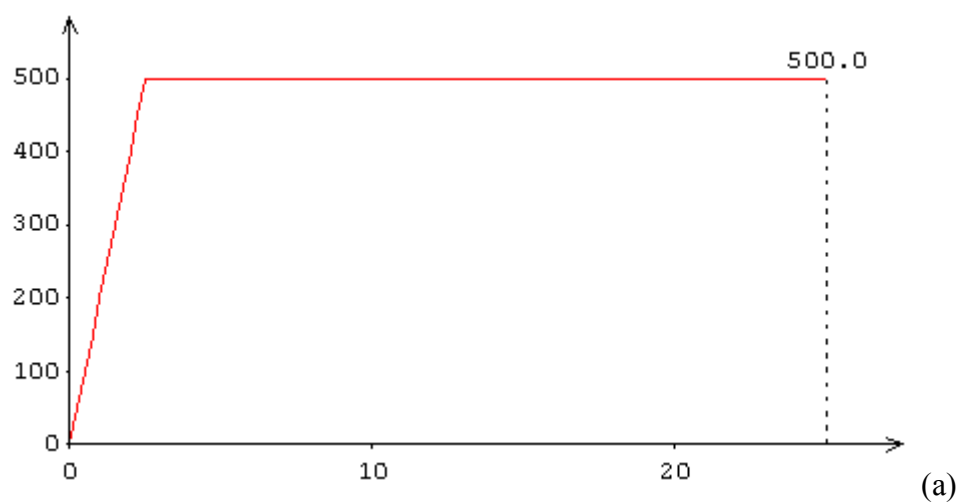
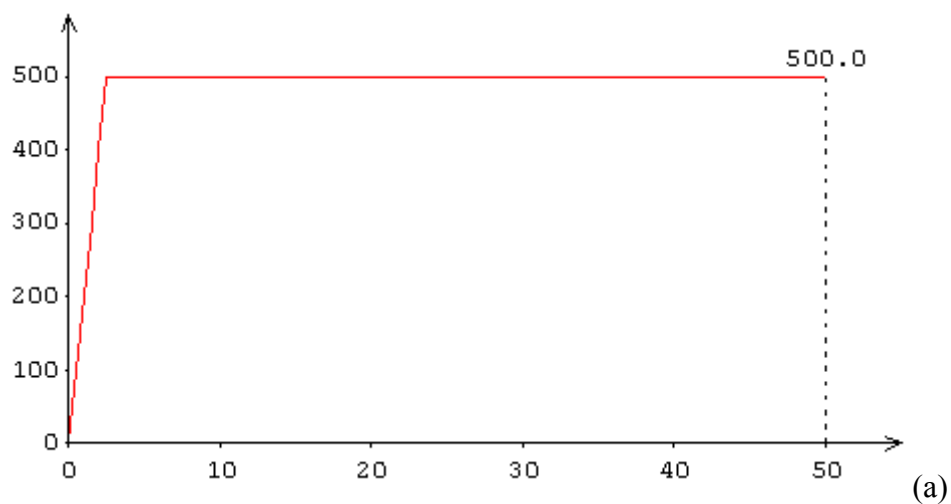


Рис.6. Диаграмма для арматуры согласно СТО НИИЖБ при  $20^{\circ}\text{C}$  (а) и  $500^{\circ}\text{C}$  (б)



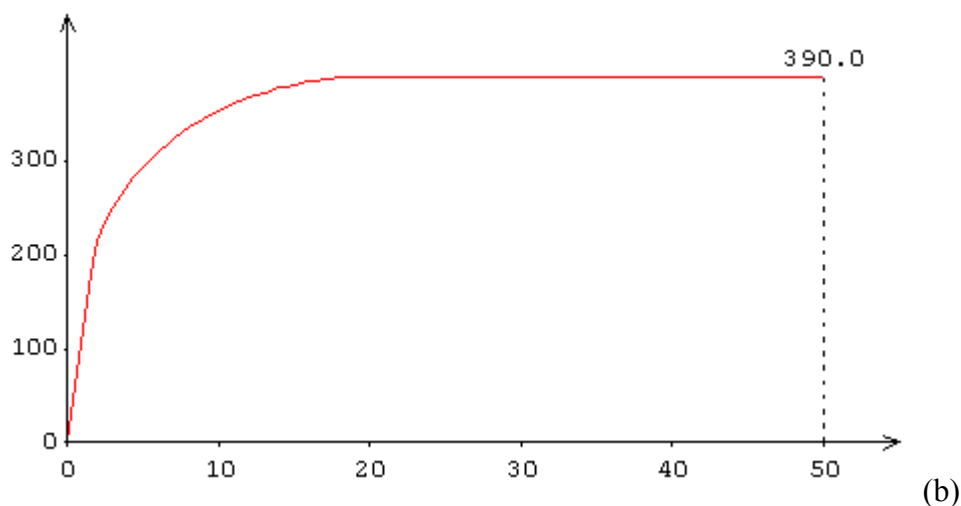


Рис.7. Диаграмма для арматуры согласно Eurocode 2 при  $20^{\circ}\text{C}$  (а) и  $500^{\circ}\text{C}$  (б)

По оси ординат откладывается напряжение  $\sigma$  [МПа], по оси абсцисс – деформация  $\varepsilon$  [‰] ( $1\text{‰}=0.1\%=0.001$ ). Диаграммы деформирования арматуры согласно СТО НИИЖБ характеризуются нормативным значением сопротивления арматуры при повышенной температуре  $R_{snt}$ , значением модуля упругости  $E_{st}$  и значением предельной деформации  $\varepsilon_{s2}$ . Деформация, при которой достигается значение  $R_{snt}$ , вычисляется по формуле:

$$\varepsilon_{s0} = \frac{R_{snt}}{E_{st}}$$

В табл.3 приведены данные для построения диаграмм деформирования арматуры по СТО НИИЖБ для классов А240, А300, А400, А500. Через  $R_{sn}$  обозначается нормативное сопротивление арматуры при нормальной температуре.

Таблица 3

T [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$\frac{R_{snt}}{R_{sn}}$	$\frac{E_{st}}{E_s}$
20	1.00	1.00
200	1.00	0.92
300	1.00	0.90
400	0.85	0.85
500	0.60	0.80
600	0.37	0.77
700	0.22	0.72
800	0.10	0.65

Предельная деформация арматуры  $\varepsilon_{s2}$  принимается равной  $25\text{‰}$  при  $20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 200^{\circ}\text{C}$  и равной  $50\text{‰}$  при  $T \geq 500^{\circ}\text{C}$ . При  $200^{\circ}\text{C} < T < 500^{\circ}\text{C}$  предельная деформация  $\varepsilon_{s2}$  определяется интерполяцией.

Диаграммы деформирования арматуры согласно Eurocode 2 строятся по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \sigma &= \varepsilon E_{s,\theta} && \text{при } 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{sp,\theta} \\ \sigma &= f_{sp,\theta} - c + (b/a)[a^2 - (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon)^2]^{0.5} && \text{при } \varepsilon_{sp,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{sy,\theta} \\ \sigma &= f_{sy,\theta} && \text{при } \varepsilon_{sy,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{st,\theta} \end{aligned}$$

Значения  $a, b, c$  вычисляются согласно следующим формулам:

$$\begin{aligned} a^2 &= (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta})(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta} + c/E_{s,\theta}) \\ b^2 &= c(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta})E_{s,\theta} + c^2 \\ c &= \frac{(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})^2}{(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta})E_{s,\theta} - 2(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})} \end{aligned}$$

Значения деформации принимаются следующими:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{sp,\theta} &= f_{sp,\theta} / E_{s,\theta} \\ \varepsilon_{sy,\theta} &= 20 \text{ ‰} \\ \varepsilon_{st,\theta} &= 50 \text{ ‰} \end{aligned}$$

В табл.4 приведены данные для построения диаграмм деформирования горячекатаной арматуры по Eurocode 2. Через  $f_{yk}$  обозначается характеристическое значение сопротивления арматуры при нормальной температуре. При расчете  $f_{yk}$  принимается равным  $R_{sn}$ .

Таблица 4

T [°C]	$\frac{f_{sy,\theta}}{f_{yk}}$	$\frac{f_{sp,\theta}}{f_{yk}}$	$\frac{E_{st}}{E_s}$
20	1.00	1.00	1.00
100	1.00	1.00	1.00
200	1.00	0.81	0.90
300	1.00	0.61	0.80
400	1.00	0.42	0.70
500	0.78	0.36	0.60
600	0.47	0.18	0.31
700	0.23	0.07	0.13
800	0.11	0.05	0.09
900	0.06	0.04	0.07
1000	0.04	0.02	0.04
1100	0.02	0.01	0.02

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  $\gamma_u$  не меньше единицы. Предполагается, что деформации в сечении распределяются по линейному закону

$\varepsilon(y, z) = \varepsilon_0 + \kappa_y y + \kappa_z z$ , где  $\kappa_y, \kappa_z$  - 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  $\sigma_b = f_b[\varepsilon(y, z)]$  - напряжение в сжатом бетоне,  $\sigma_s = f_s[\varepsilon(y, z)]$  - напряжение в арматуре,  $A_b$  - сжатая зона сечения,  $A_s$  - площадь арматуры.

Для определения интегралов по  $A_b$  производится разбиение сжатой зоны на малые элементы, в пределах которых напряжение считается постоянным. Определение интегралов сводится к вычислению конечных сумм.

Распределение деформаций в предельном состоянии  $\varepsilon_u(y, z)$  отыскивается из условия, чтобы деформации сжатого бетона не превосходили предельного значения  $\varepsilon_{b2}$  при расчете по СТО НИИЖБ и  $\varepsilon_{c1, \theta}$  при расчете по Eurocode 2. Деформации арматуры ограничиваются значением  $\varepsilon_{s2}$  согласно СТО НИИЖБ и  $\varepsilon_{st, \theta}$  согласно Eurocode 2. Для каждого положения нейтральной линии однозначно определяется распределение деформаций в предельном состоянии. В результате решения системы трех нелинейных уравнений, определяется положение нейтральной линии и коэффициент запаса прочности  $\gamma_u$ . На рис.8 приведен пример зависимости коэффициента  $\gamma_u$  от времени при стандартном пожаре. В программе предусмотрен вывод результатов расчета предельных усилий для момента времени, практически равном пределу огнестойкости элемента. Помимо предельных усилий, выводятся максимальные и минимальные (в алгебраическом смысле) деформации бетона и арматуры, а также кривизны. В случае, когда нейтральная линия пересекает сечение элемента, выводится изображение сечения, на котором показывается сжатая зона.

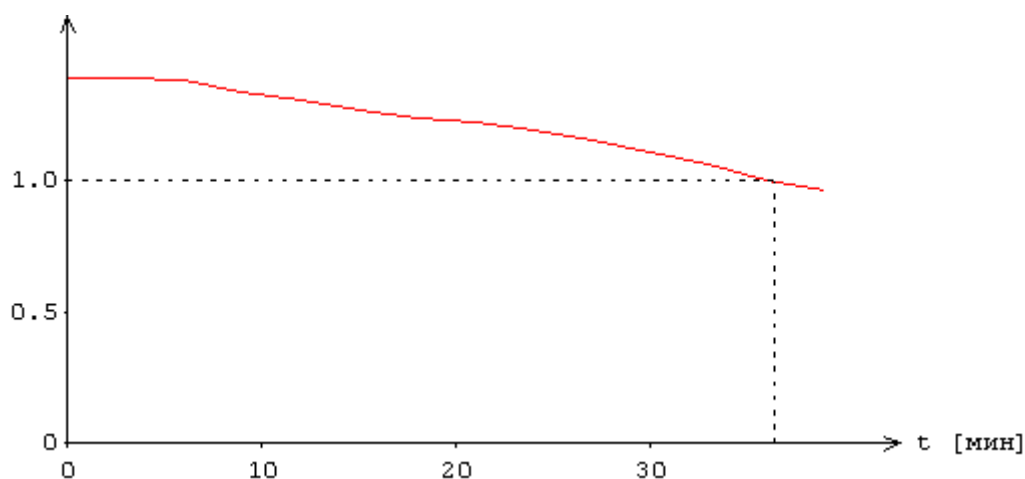
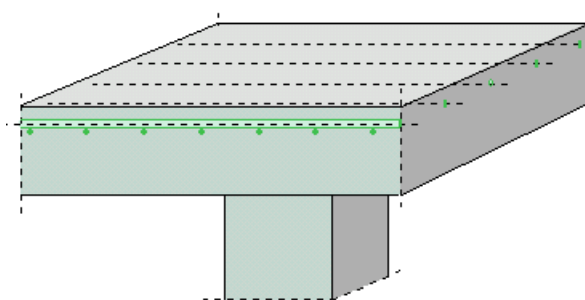


Рис.8. Пример зависимости коэффициента  $\gamma_u$  от времени

## Литература

1. СТО 36554501-006-2006: Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций / ФГУП «НИЦ «Строительство». – М.: ФГУП ЦПП, 2006.
2. DIN EN 1992-1-2: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung fuer den Brandfall. Oktober 2006.
3. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры / ГУП «НИИЖБ», ФГУП ЦПП. – М., 2004.
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.

## 454 – Расчет на продавливание при огневом воздействии



Программа предназначена для расчёта на продавливание железобетонной плиты при огневом воздействии согласно СТО 36554501-006-2006 [1] и СП 52-101-2003 [2]. Температурное поле в плите при огневом воздействии определяется путем решения задачи нестационарной теплопроводности с учетом зависимости теплофизических характеристик бетона от температуры. Нормативные сопротивления бетона и поперечной арматуры при нормальной температуре принимаются согласно [2]. Предусмотрена возможность задания материалов с ненормированной прочностью. 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 нагрузка

Рассматривается железобетонная плита толщиной  $h$ , опирающаяся на колонну прямоугольного или круглого сечения. В плоскости плиты вводится декартова 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).

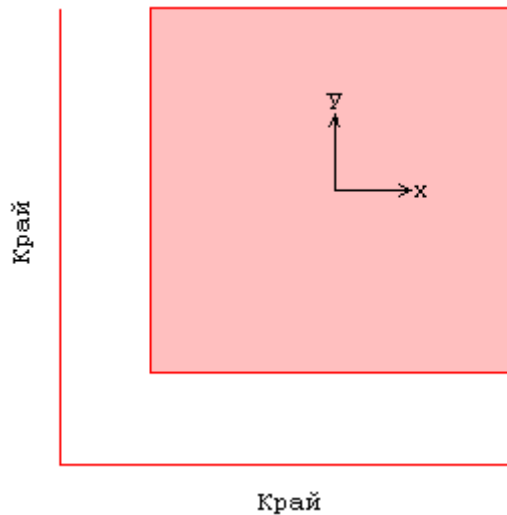


Рис.1. Пример угловой колонны

При расчете рабочая высота сечения плиты принимается равной  $h_0 = (h_{0x} + h_{0y}) / 2$ , где  $h_{0x}$ ,  $h_{0y}$  - рабочие высоты для продольной арматуры в направлении осей  $x, y$ . 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 или крестообразное расположение арматуры. При равномерном расположении арматуры, хомуты размещаются по всей зоне продавливания (рис.2), а при крестообразном расположении – сосредоточенно, у осей сечения колонны (рис.3).

Расстояние между колонной и ближайшими к ней хомутами должно быть не меньше  $h_0 / 3$  и не больше  $h_0 / 2$ . Ширина зоны армирования должна быть не меньше  $1.5h_0$ .



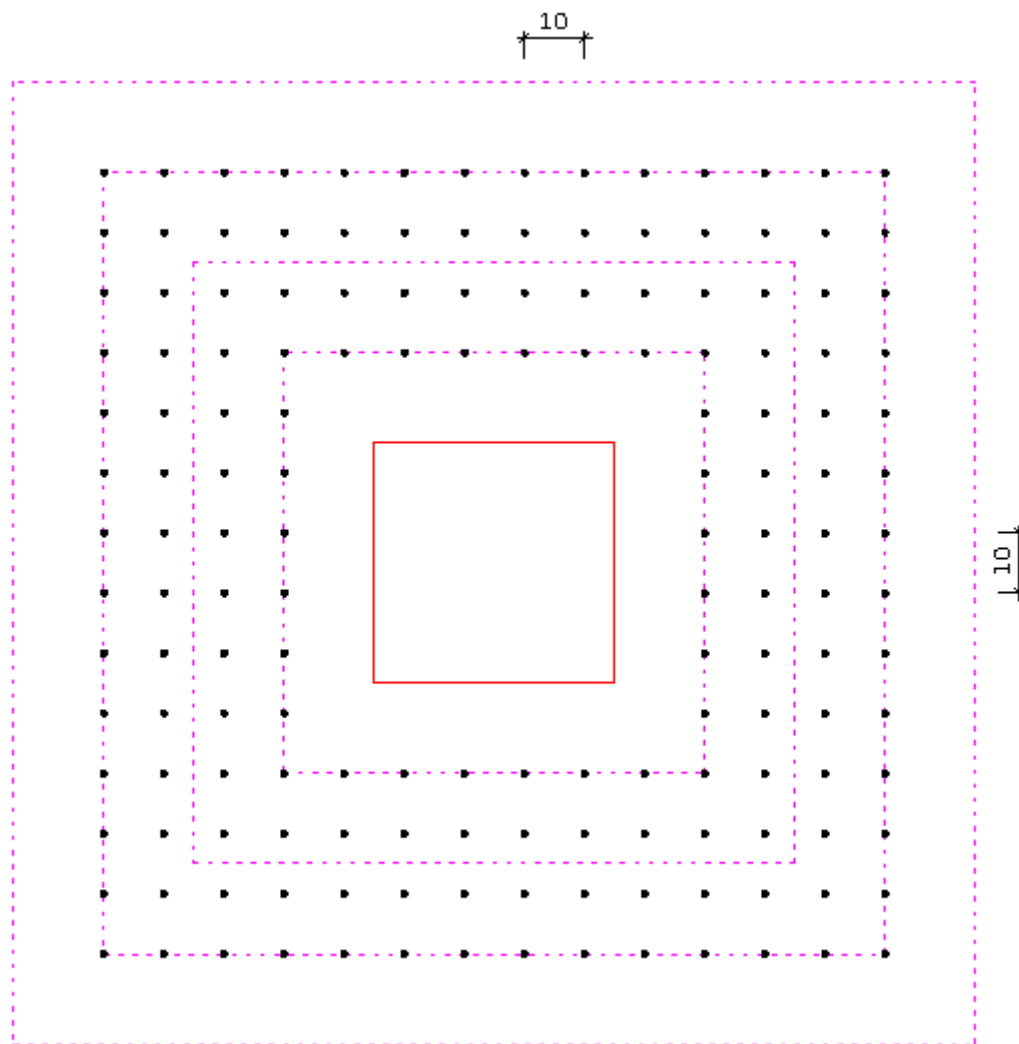


Рис.2. Пример равномерного расположения арматуры

В случае круглой колонны, хомуты устанавливаются по направлениям, перпендикулярным к расчетному контуру (рис.4).

Расчет на продавливание при огневом воздействии проводится для усилий от наиболее неблагоприятных сочетаний нормативных постоянных и длительных нагрузок. В том случае, когда нельзя установить усилия от нормативных нагрузок, допускается принимать их равными 0,7 от расчетных усилий. Нагрузка на плиту, действующая в пределах сечения колонны, характеризуется продавливающей силой  $F$  и изгибающими моментами  $M_x, M_y$  относительно осей  $x, y$ . Согласно [2] 6.2.46, при расчете на продавливание следует учитывать только половины сосредоточенных моментов, действующих на плиту.

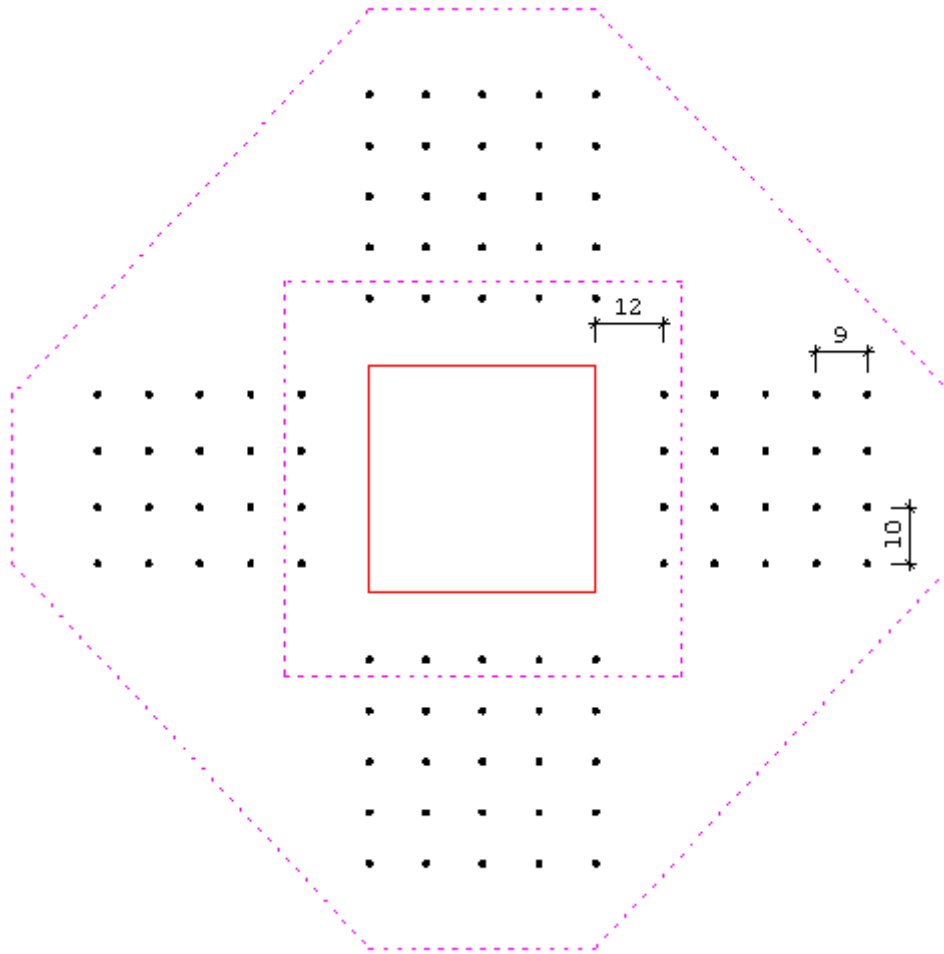


Рис.3. Пример крестообразного расположения арматуры

## 2. Расчет на продавливание

Расчет на продавливание плиты при нормальной температуре проводится согласно [2], 6.2.46 – 6.2.52. 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 (как правило,  $A_{sw}$  определяется для двух хомутов);  $W_{bx}, W_{by}$  - моменты сопротивления расчетного контура, соответствующие изгибающим моментам  $M_x, M_y$  и имеющие размерность квадрата единицы длины. 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.

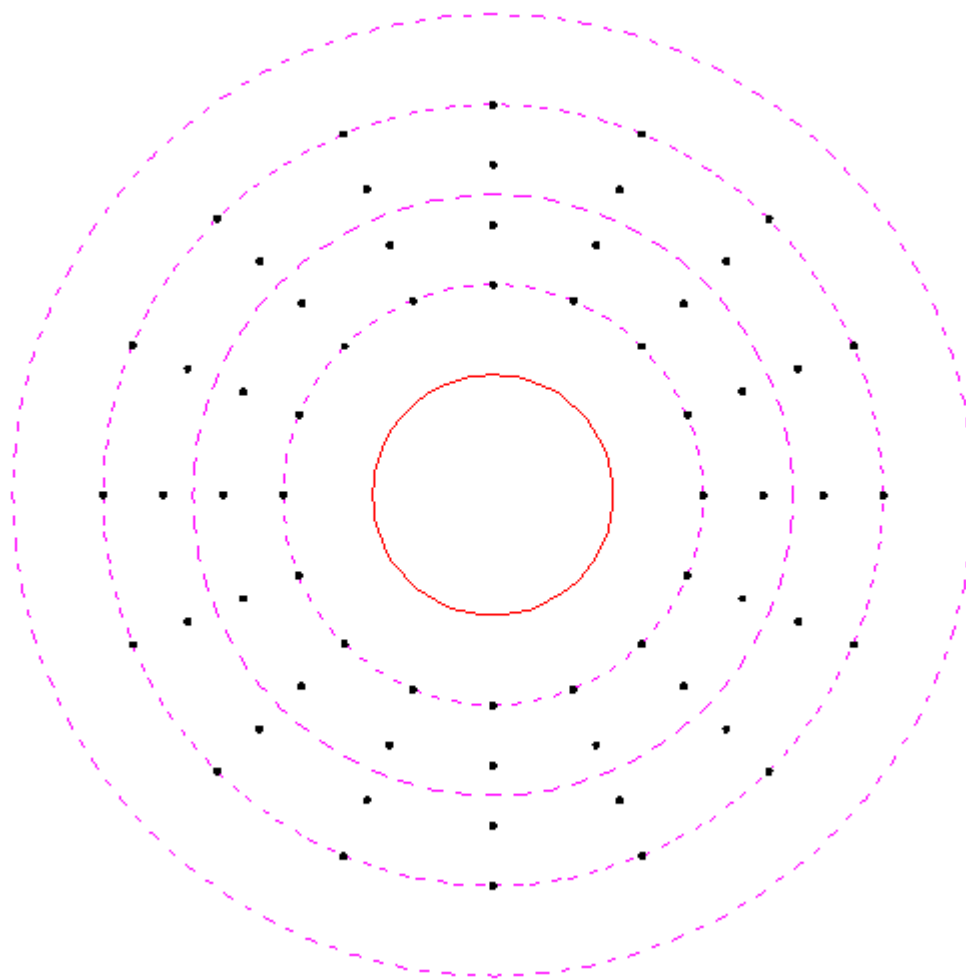


Рис.4. Пример расположения арматуры в случае круглой колонны

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 трех дробей в условии прочности ограничиваются значениями  $2F_{b,ult}$ ,  $2M_{bx,ult}$ ,  $2M_{by,ult}$ . Согласно указаниям [2] 6.2.46, учитывается ограничение:

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

В соответствии с [2] 6.2.48, 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.6.12. 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.6.12.

### 3. Расчет на продавливание при огневом воздействии

При огневом воздействии рассматривается нагрев нижней стороны плиты. Изменение температуры по толщине 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,  $t$  - время,  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности,  $c$  - удельная теплоемкость,  $\rho$  - плотность материала. При расчете температуры не учитывается влияние арматуры. 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  $\Delta t$  - шаг по времени. Расчет температуры производится для дискретных моментов времени. Пример изменения температуры по толщине плиты приведен на рис.5.

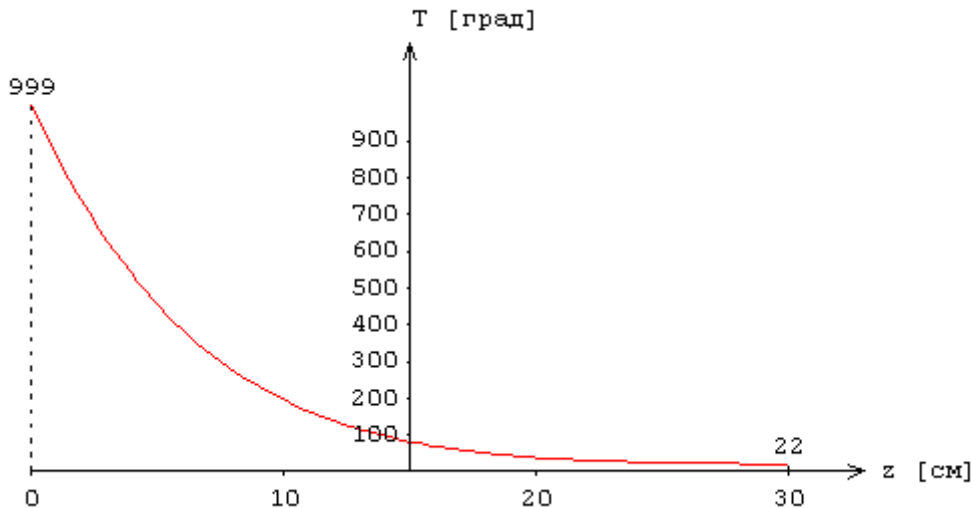


Рис.5. Пример изменения температуры по толщине плиты

Расчет на продавливание при огневом воздействии проводится аналогично расчету для плиты при нормальной температуре. При этом применяется среднее значение нормативного сопротивления бетона  $R_{btm,t}$ , которое вычисляется в соответствии с изменением температуры по толщине плиты. При расчете плиты с поперечной арматурой используется нормативное сопротивление арматуры  $R_{swm,t}$ , которое определяется для наибольшего значения температуры хомутов. Предполагается, что наибольшая температура хомутов равна температуре бетона на расстоянии от нагреваемой поверхности, равном толщине защитного слоя бетона.

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

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

Согласно [1], огнестойкость элемента характеризуется периодом времени от начала пожара до момента возникновения предельного состояния элемента. Для несущих элементов предельным состоянием по огнестойкости является потеря несущей способности. Предельное состояние

плиты при продавливании наступает при  $\gamma = 1$ . В программе строится зависимость коэффициента запаса прочности  $\gamma$  от времени (рис.6). Предел огнестойкости определяется по моменту времени, при котором  $\gamma = 1$ .

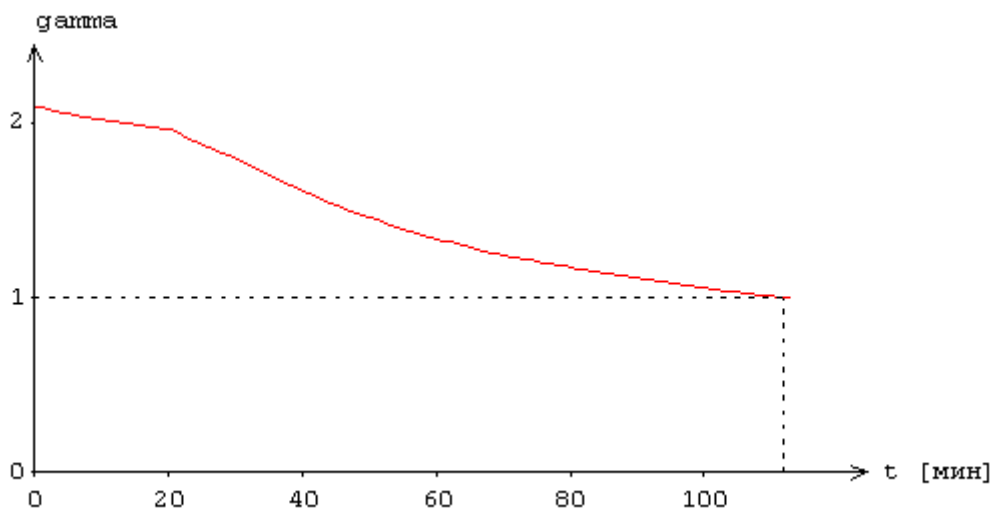
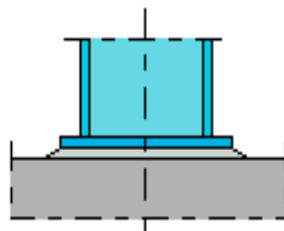


Рис.6. Пример изменения коэффициента  $\gamma$  по времени

## Литература

1. СТО 36554501-006-2006: Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций / ФГУП «НИЦ «Строительство». – М.: ФГУП ЦПП, 2006.
2. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры / ГУП «НИИЖБ», ФГУП ЦПП. – М., 2004.

## 462 – База колонны



Программа предназначена для подбора размеров базы стальной колонны двутаврового сечения согласно СНиП II-23-81\* [1] или СП 53-102-2004 [2]. Предусмотрена проверка прочности базы заданных размеров. Для определения изгибающих моментов в опорной плите применяется метод конечных элементов.

## 1. Конструкция

Предусмотрен расчет для двух видов баз колонн: для баз без траверс и для баз с траверсами. При расчете применяется система координат с началом в средней точке стенки двутаврового сечения колонны. Ось  $y$  принимается параллельной плоскости полки, а ось  $z$  - параллельной плоскости стенки. При расчете базы без траверс ширина  $b_y$  опорной плиты по оси  $y$  полагается равной ширине двутавра. Траверсы устанавливаются параллельно оси  $y$ .

Предусмотрено два вида сопряжения колонны с фундаментом: шарнирное и жесткое. При шарнирном сопряжении передача момента на фундамент ограничена предельным моментом отпора фундамента, который существенно зависит от величины вертикальной нагрузки. При жестком сопряжении устанавливаются анкеры, которые позволяют передавать значительные моменты и препятствуют повороту опорной плиты. Для базы без траверс анкерные болты устанавливаются в пределах опорной плиты, а для базы с траверсами – за ее пределами. Допускается установка одного или двух анкерных болтов с одной стороны базы. Для базы без траверс расстояние  $a_z$  до оси анкерного болта по направлению  $z$  отсчитывается от края опорной плиты внутрь плиты, а для базы с траверсами – наружу. При установке двух анкерных болтов с одной стороны базы задается расстояние  $a_y$  до оси анкерного болта по направлению  $y$ , которое отсчитывается либо от края опорной плиты, либо от грани траверсы. При проверке прочности базы заданных размеров расстояния до оси анкерного болта задаются в миллиметрах, а при подборе – в диаметрах анкерного болта.

## 2. Нагрузки

В качестве нагрузок рассматриваются усилия  $N, M_y, M_z, Q_y, Q_z$ , действующие в опорном сечении колонны. Для базы с траверсами следует задавать усилия в сечении колонны на уровне высоты траверсы. При прямом изгибе в плоскости наибольшей жесткости сечения колонны задаются момент  $M_y$  относительно оси  $y$  и поперечная сила  $Q_z$  по оси  $z$ , а при косом изгибе моменты  $M_y, M_z$  и поперечные силы  $Q_y, Q_z$ . При действии положительного момента  $M_y$  наибольшее сжатие фундамента возникает на краю плиты, для которого  $z > 0$ , а при действии положительного момента  $M_z$  наибольшее сжатие фундамента возникает на краю плиты, для которого  $y > 0$ . Поперечные силы  $Q_y, Q_z$  учитываются только при определении требуемых катетов сварных швов соединения торца колонны, траверс и опорной плиты.

## 3. Расчет базы

Расчет базы колонны включает расчет отпора фундамента, определение наибольшего изгибающего момента в опорной плите, проверку прочности опорной плиты, проверку прочности анкерных болтов, определение требуемых катетов сварных швов соединения торца колонны, траверс и опорной плиты, проверку прочности траверс, определение требуемого катета сварных швов соединения колонны и траверс.

Расчет отпора фундамента проводится на основе трехлинейной диаграммы деформирования сжатого бетона, представленной в [3]. Предполагается, что опорная плита поворачивается как



жесткое целое. Данное предположение оправдано существенным различием деформационных свойств стали для опорной плиты и бетона для фундамента. Применение нелинейной диаграммы деформирования сжатого бетона позволяет корректно определить, при действии моментной нагрузки, распределение отпора фундамента по площади опорной плиты и поворот опорной плиты. При жестком сопряжении колонны с фундаментом, одновременно с отпором фундамента определяются усилия в анкерных болтах. При этом применяется диаграмма упругопластического деформирования стали для анкерных болтов. Степень затяжки анкерных болтов не учитывается. В выходном документе программы в графической форме приводятся распределения реактивного давления  $\sigma_b$  по краям опорной плиты. При действии моментов может возникать отрыв опорной плиты от фундамента. В зоне отрыва реактивное давление отсутствует. Предусмотрен вывод равнодействующей  $N_b$  реактивного давления  $\sigma_b$  и эксцентриситетов  $e_y, e_z$  равнодействующей  $N_b$  по направлениям  $y, z$  (с учетом знака). При действии моментной нагрузки выводится значение угла поворота опорной плиты вокруг нейтральной линии.

Расчет наибольшего изгибающего момента в опорной плите может проводиться одним из двух методов: упрощенным методом и методом конечных элементов. Упрощенный метод излагается в методиках по проектированию баз колонн (например, в [4]) и заключается в разбиении опорной плиты на отдельные прямоугольные плиты, опертые или защемленные по некоторым сторонам. Наибольший изгибающий момент в каждой из плит определяется на основе готовых решений задач об изгибе прямоугольных пластин, находящихся под действием равномерно распределенной поперечной нагрузки. Величина нагрузки при расчете отдельных плит принимается равной наибольшему отпору фундамента в пределах плит. Для рассматриваемых конструкций базы используются решения для плиты, опертой по двум сторонам и защемленной по одной стороне, для плиты, защемленной по трем сторонам, для плиты, защемленной по четырем сторонам, и для консольной плиты.

Метод конечных элементов (МКЭ) позволяет получить более точный результат. При помощи МКЭ опорная плита рассчитывается как плита, опертая по средним линиям сечений полок и стенки двутавра и по средним линиям сечений траверс. В качестве нагрузки рассматривается реактивное давление фундамента, которое, в общем случае, существенно неравномерно распределено по площади плиты. При расчете базы без траверс с анкерами учитывается нагружение опорной плиты сосредоточенными нагрузками от анкерных болтов.

Условие прочности опорной плиты имеет вид

$$\sigma_{\max} / R_{yo} \gamma_c \leq 1$$

где  $\sigma_{\max} = \frac{6M_{\max}}{t^2}$ ,  $M_{\max}$  - наибольший изгибающий момент в плите,  $t$  - толщина плиты,  $R_{yo}$  - расчетное сопротивление стали для опорной плиты,  $\gamma_c$  - коэффициент условий работы опорной плиты, принимаемый согласно [1], табл. 6\* или [2], табл. 1. Согласно [2] (Примечание 3 к табл.1), коэффициент  $\gamma_c$  для опорной плиты учитывается совместно с коэффициентом  $\gamma_c$  для колонны.

Условие прочности анкерных болтов имеет вид:

$$N_{a\max} / N_{ua} \leq 1$$

где  $N_{a\max}$  - наибольшее усилие в анкерных болтах,  $N_{ua} = A_{bn} R_{ba}$  - предельное усилие в анкерном болте,  $A_{bn}$  - площадь сечения анкерного болта (по резьбе),  $R_{ba}$  - расчетное сопротивление стали для анкерных болтов. Расчетное сопротивление стали  $BCт3кп2$ , применяемой для анкерных болтов, согласно [1] табл. 60\*, не зависит от диаметра болта, а согласно [2] табл. Г.7, расчетное сопротивление принимается в зависимости от диаметра болта.

В программе предусмотрено задание другой марки стали. При определении усилий в анкерных болтах применяется диаграмма упругопластического деформирования стали с предельным напряжением  $R_{ba}$ .

Требуемые катеты сварных швов соединения торца колонны, траверс и опорной плиты определяются из условий прочности по металлу шва и по металлу границы сплавления:

$$\tau_f / R_{wf} \leq 1$$

$$\tau_z / R_{wz} \leq 1$$

где  $R_{wf}$  - расчетное сопротивление угловых швов срезу по металлу шва,  $R_{wz} = 0.45R_{um}$  - расчетное сопротивление угловых швов срезу по металлу границы сплавления,  $R_{um}$  - временное сопротивление стали. Сталь для колонны и сталь для базы могут быть различными. При проверке прочности по металлу границы сплавления швов соединения колонны и опорной плиты, а также швов соединения колонны и траверс используется меньшее значение  $R_{wz}$ . Напряжения  $\tau_f$  и  $\tau_z$  вычисляются по формулам вида ([1], 11.5 и [2], 15.1.19):

$$\tau = \sqrt{\tau_{NM}^2 + \tau_Q^2}$$

где  $\tau_{NM}$  - напряжение от действия усилий  $N, M_y, M_z$ ;  $\tau_Q$  - напряжение от действия поперечной силы  $Q_y$  или  $Q_z$ . Указанные напряжения определяются по формулам

$$\tau_{NM} = N / A + M_y z / I_y + M_z y / I_z$$

$$\tau_{Q_y} = Q_y / A_y$$

$$\tau_{Q_z} = Q_z / A_z$$

Здесь  $A, I_y, I_z$  - площадь и моменты инерции расчетного сечения сварных швов,  $A_y$  и  $A_z$  - площади сечений сварных швов, которые воспринимают поперечную силу  $Q_y$  и  $Q_z$  соответственно;  $y, z$  - координаты точки, в которой вычисляется напряжение  $\tau$ . Расчетные толщины сварных швов принимаются равными  $\beta_f k_f$  при проверке по металлу шва и  $\beta_z k_f$  при проверке по металлу границы сплавления. Здесь  $k_f$  - катет сварного шва. В программе приняты коэффициенты  $\beta_f = 0.7$  и  $\beta_z = 1$ .

При расчете базы с траверсами и анкерами усилия  $N, M_y, M_z$ , по которым производится расчет напряжений в сварных швах, определяются с учетом действия анкеров по формулам

$$N = N_0 + \sum_i N_{ai}$$

$$M_y = M_{y0} + \sum_i N_{ai} z_{ai}$$

$$M_z = M_{z0} + \sum_i N_{ai} y_{ai}$$

где  $N_0, M_{y0}, M_{z0}$  - заданные усилия в расчетном сечении колонны,  $N_{ai}$  и  $y_{ai}, z_{ai}$  - усилие в анкерном болте и координаты его оси.

Катеты угловых швов  $k_f$  принимаются не менее указанных в [1] табл.38\*, или [2] табл.35, и не более  $1.2t_{\min}$ , где  $t_{\min}$  - наименьшая из толщин свариваемых элементов. В выходном документе помечаются катеты, которые принимаются равными наименьшему или наибольшему значению

согласно нормативным указаниям. Если наибольшее значение катета оказывается меньше значения, требуемого по расчету, то условие прочности не удовлетворяется.

Предусмотрена возможность учета указания норм, согласно которому расчетные длины непрерывных участков сварных швов должны приниматься на 10 мм меньшими, чем их фактические длины.

При расчете базы с траверсами предусмотрен неучет приварки торца колонны к опорной плите. Тогда учитываются только сварные швы соединения траверс и опорной плиты.

Траверсы рассматриваются как однопролетные балки с консолями. Принимается, что траверса опирается в точках приварки к полкам стержня колонны. Нагрузка на траверсу определяется по напряжениям, действующим в швах приварки траверсы к опорной плите. В общем случае, на каждом из трех участков траверсы действует нагрузка, распределенная по линейному закону. В выходном документе программы выводится эпюра нагрузки и значения  $q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6$  нагрузки на концах участков. При наличии анкеров траверсы воспринимают сосредоточенные вертикальные силы  $Q$ , обусловленные их действием. Для каждой из двух траверс определяется наибольший изгибающий момент, а затем из двух полученных значений выбирается наибольшее значение  $M_{\max}$ , и проводится проверка прочности. Условие прочности имеет вид:

$$\sigma_{\max} / R_{yo} \leq 1$$

где  $\sigma_{\max} = \frac{6M_{\max}}{t_t h_t^2}$ ;  $t_t, h_t$  - толщина и высота траверсы.

Требуемый катет сварных швов соединения колонны и траверс определяется по наибольшей из сил, действующих на опоры траверс, при условиях прочности:

$$\tau_f / R_{wf} \leq 1$$

$$\tau_z / R_{wz} \leq 1$$

При этом учитывается нормативное ограничение расчетной длины сварного шва  $l_w \leq 85\beta_f k_f$ .

Следует отметить, что различие норм [1] и [2] проявляется в значениях коэффициента условий работы опорной плиты, расчетного сопротивления стали для анкерных болтов и минимального катета сварного углового шва.

#### 4. Подбор размеров базы

Размеры опорной плиты  $b_y, b_z$  варьируются в рамках заданных предельных размеров  $b_{y\max}, b_{z\max}$ . Из всех пар  $b_y, b_z$ , для которых выполняется условие прочности опорной плиты, выбирается пара, для которой критерий подбора (периметр или площадь плиты) принимает наименьшее значение.

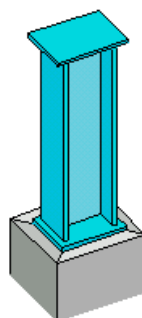
Высота траверсы  $h_t$  ограничивается предельной высотой  $h_{t\max}$ . Принимается наименьшее из значений  $h_t$ , для которых выполняются условия прочности траверсы и сварных швов соединения колонны и траверсы.

Диаметр  $d$  анкерных болтов варьируется от  $d_{\min}$  до  $d_{\max}$ . Возможен подбор размеров базы при фиксированном диаметре анкерных болтов (при  $d_{\max} = d_{\min}$ ).

## Литература

1. СНиП II-23-81\*. Стальные конструкции/Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.
2. СП 53-102-2004. Общие правила проектирования стальных конструкций/Госстрой России. – М.: ФГУП ЦПП, 2005. – 132 с.
3. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры / ГУП «НИИЖБ», ФГУП ЦПП. – М., 2004.
4. Металлические конструкции: Справочник проектировщика. – 2-е изд./Под ред. Н.П.Мельникова. – М: Стройиздат, 1980.

## 465 – Подбор сечения стального элемента



Программа предназначена для подбора сечений изгибаемых и внецентренно сжатых стальных элементов согласно СНиП II-23-81\* [1] или СП 53-102-2004 [2]. Предусмотрена проверка заданного сечения.

## 1. Виды сечений

Рассматриваются прокатные и сварные сечения стальных элементов. Сечение изгибаемого элемента (балки) может подбираться из следующих сортаментов: двутавр балочный, двутавр широкополочный, двутавр колонный, двутавр обычный. Для внецентренно сжатого элемента (колонны), помимо указанных, при подборе, применяются следующие сортаменты: профиль замкнутый квадратный (по ГОСТ 12336-66), профиль замкнутый прямоугольный (по ГОСТ 12336-66), труба бесшовная горячекатаная (по ГОСТ 8732-78\*), труба электросварная (по ГОСТ 10704-91).

Предусмотрен подбор сварного двутаврового сечения. Для колонны дополнительно может подбираться сварное сечение из двух одинаковых прокатных или сварных двутавров, образованное путем их соединения листом в плоскости меньшей жесткости двутавра.

## 2. Подбор сечения

Подбор производится по заданным расчетным сочетаниям усилий. При прямом изгибе задаются изгибающий момент  $M_y$  и поперечная сила  $Q_z$ . Для колонны дополнительно задается продольная сила  $N$ , которая принята положительной при сжатии. При рассмотрении балки изгибающий момент  $M_y$  должен задаваться с учетом знака. При этом момент  $M_y$  считается положительным, если при его действии сжатая зона возникает в верхней части сечения. При косом изгибе дополнительно задаются изгибающий момент  $M_z$  и поперечная сила  $Q_y$ . Индексы в обозначениях усилий соответствуют обозначениям главных осей сечения. Ось, параллельная плоскости стенки, обозначается через  $z$ , а ось, параллельная плоскости полки, - через  $y$ . Индекс изгибающего момента указывает на ось, относительно которой определен момент. Индекс поперечной силы соответствует оси, в плоскости которой действует сила. При рассмотрении балки возможно задание локальной нагрузки  $F$ , приложенной к верхнему поясу балки. Нагрузка с положительным знаком направлена сверху вниз и является сжимающей.

Подбор прокатного профиля производится путем последовательной выборки профилей из заданного сортамента и проверки их несущей способности. Если при вводе исходных данных указан конкретный номер профиля, то выборка начинается с указанного номера. В противном случае, выборка начинается с первого номера сортамента.

При подборе сварного двутаврового сечения варьируются высота  $h$  и ширина  $b$  сечения, толщина стенки  $t_w$  и толщина полки  $t_f$ . Толщины принимаются из следующего ряда значений: 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 30, 32, 36, 40 (выборка из ГОСТ 19903-74\*). При этом ставятся ограничения  $t_w \leq t_f \leq n \cdot t_w$ . Коэффициент  $n$ , равный наибольшему значению отношения толщины полки к толщине стенки, задается при вводе в пределах от 1 до 4. Высота и ширина сечения ограничиваются заданными минимальными и максимальными значениями:  $h_{\min} \leq h \leq h_{\max}$ ,  $b_{\min} \leq b \leq b_{\max}$ . При этом рассматриваются сечения, для которых  $b \leq h$ . При подборе все сечения, удовлетворяющие указанным ограничениям, рассматриваются в порядке увеличения их площади. Из полученного ряда сечений выбирается то первое сечение, для которого выполняются все предусмотренные проверки. При неполном подборе толщины  $t_w$  и  $t_f$  задаются произвольными значениями, находящимися в пределах от 4мм до 40мм.

Подбор сварного сечения колонны, образованного из двух прокатных двутавров, заключается в подборе прокатного двутавра из заданного сортамента и подборе размеров листа, соединяющего двутавры. Возможен выбор профиля из сортаментов колонных, широкополочных и балочных двутавров. Толщина соединительного листа  $t_d$  принимается из вышеуказанного ряда значений. Ширина листа  $b_d$  принимается не меньшей, чем сумма удвоенной ширины свеса полки и расстояния между полками  $a_f$ . Расстояние  $a_f$  ограничивается заданными минимальным и максимальным значениями:  $a_{f,\min} \leq a_f \leq a_{f,\max}$ . При неполном подборе толщина  $t_d$  задается произвольным значением, находящимся в пределах от 4мм до 40мм.

Подбор сварного сечения колонны, образованного из двух сварных двутавров, состоит в подборе сварного двутавра и подборе размеров соединительного листа, которые производятся аналогично описанному выше. Дополнительно ставятся следующие ограничения:  $t_d \leq t_w \leq n \cdot t_d$ .

В выходном документе программы выводятся следующие характеристики сечения:

$A$  - площадь,  $I_y$  и  $I_z$  - моменты инерции относительно осей  $y$  и  $z$ ,  $W_y$  и  $W_z$  - моменты сопротивления относительно осей  $y$  и  $z$ ,  $S_y$  - статический момент половины сечения относительно оси  $y$ ,  $I_t$  - момент инерции при свободном кручении.

### 3. Расчет балки

Предусмотрены два вида расчета на прочность: расчет в пределах упругих деформаций и расчет с учетом развития пластических деформаций. При упругом расчете условия прочности имеют вид.

$$\frac{\sigma}{R_y \gamma_c} \leq 1$$

$$\frac{\tau}{R_s \gamma_c} \leq 1$$

Здесь  $\sigma$  - нормальное напряжение,  $\tau$  - касательное напряжение;  $R_y, R_s$  - расчетные сопротивления стали,  $\gamma_c$  - коэффициент условий работы, который принимается согласно таблице 6\* из [1] или таблице 1 из [2].

При наличии локальной нагрузки производится проверка прочности стенки балки по условию:

$$\frac{\sigma_{loc}}{R_y \gamma_c} \leq 1$$

где  $\sigma_{loc} = \frac{F}{t_w l_{ef}}$ ,  $l_{ef} = b_F + 2t_f$  - длина распределения нагрузки,  $b_F$  - ширина области приложения локальной нагрузки.

Прочность стенки балки проверяется по приведенному напряжению согласно условию:

$$\frac{\sigma_v}{1.15 R_y \gamma_c} \leq 1$$

где  $\sigma_v = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_z + \sigma_z^2 + 3\tau_{xz}^2}$  - приведенное напряжение,  $\sigma_x$  - нормальное напряжение, параллельное оси балки  $x$ ,  $\sigma_z$  - нормальное напряжение, параллельное оси  $z$  и равное  $\sigma_{loc}$ ,  $\tau_{xz}$  - касательное напряжение.

Пластический расчет согласно [1], п.5.25\* проводится по условию:

$$\frac{M_y}{c_y W_y R_y \gamma_c} + \frac{M_z}{c_z W_z R_y \gamma_c} \leq 1$$

при ограничениях  $\tau_z \leq 0.9R_s$ , если  $M_z = 0$ , и  $\tau_z \leq 0.5R_s$ ,  $\tau_y \leq 0.5R_s$ , если  $M_z \neq 0$ . Средние касательные напряжения определяются по формулам:

$$\tau_z = \frac{Q_z}{A_w}, \quad A_w = t_w h_w, \quad h_w = h - 2t_f$$

$$\tau_y = \frac{Q_y}{2A_f}, \quad A_f = t_f b$$

Коэффициенты  $c_y$  и  $c_z$ , которые характеризуют сопротивление изгибу пластифицированного сечения, принимаются по таблице 66 из [1]. При  $M_z = 0$  и  $\tau_z > 0.5R_s$  коэффициент  $c_y$  заменяется на коэффициент  $1.05\beta c_y$ , который не должен превышать  $c_y$ . Коэффициент  $\beta$

вычисляется по формуле:  $\beta = \sqrt{\frac{1 - (\tau_z / R_s)^2}{1 - 0.7(\tau_z / R_s)^2}}$ .

Пластический расчет согласно [2], п.10.1.1 проводится по условию

$$\frac{M_y}{c_y \beta W_y R_y \gamma_c} + \frac{M_z}{c_z \beta W_z R_y \gamma_c} \leq 1$$

при ограничениях  $\tau_z \leq 0.9R_s$ , если  $M_z = 0$ , и  $\tau_z \leq 0.9R_s$ ,  $\tau_y \leq 0.5R_s$ , если  $M_z \neq 0$ . При  $\tau_z > 0.5R_s$  коэффициент  $\beta$  вычисляется по формуле:

$$\beta = 1 - \frac{0.20}{\alpha_f + 0.25} \left( \frac{\tau_z}{R_s} \right)^4$$

где  $\alpha_f = A_f / A_w$ . При  $\tau_z \leq 0.5R_s$  коэффициент  $\beta$  принимается равным 1.

При упругом расчете проводится проверка устойчивости плоской формы изгиба балки. Потеря устойчивости происходит по изгибно-крутильной форме. Проверка при прямом изгибе проводится согласно [1], п.5.15 или [2], п.9.4.1 по условию:

$$\frac{M_y}{\varphi_b W_y R_y \gamma_c} \leq 1$$

При косом изгибе применяется условие:

$$\frac{M_y}{\varphi_b W_y R_y \gamma_c} + \frac{M_z}{W_z R_y \gamma_c} \leq 1$$

Коэффициент  $\varphi_b$  определяется по [1], прил.7\* или [2], прил.М.

При пластическом расчете согласно [1] п.5.20, или [2] п.9.4.6, для обеспечения общей устойчивости балки необходимо либо непрерывное закрепление сжатого пояса, либо



прерывистое закрепление с шагом, ограниченным нормативным значением согласно [1], таблица 8\* или [2], таблица 10.

Проверки устойчивости стенки и полок проводятся согласно [1], пп. 7.1, 7.2, 7.4, 7.6\*, 7.22\*, 7.24 или [2], пп. 9.5.2, 9.5.3, 9.5.4, 9.5.5, 9.5.14, 9.5.15. Условие устойчивости стенки записывается в виде:

$$\frac{\bar{\lambda}_w}{\bar{\lambda}_{uw}} \leq 1$$

Здесь  $\bar{\lambda}_w = (h_{ef} / t_w) \sqrt{R_y / E}$  - условная гибкость стенки,  $h_{ef}$  - расчетная высота стенки,  $t_w$  - толщина стенки,  $\bar{\lambda}_{uw}$  - предельная условная гибкость стенки. Расчетная высота стенки  $h_{ef}$  равна расстоянию между началами внутренних закруглений для прокатного профиля и равна полной высоте стенки для сварного профиля. При подборе сечения определяется шаг поперечных ребер, при котором выполняется условие проверки устойчивости стенки. При этом учитываются требования [1], п. 7.10 или [2], п. 9.5.9.

Условие проверки устойчивости полки имеет аналогичный вид:

$$\frac{\bar{\lambda}_f}{\bar{\lambda}_{uf}} \leq 1$$

Здесь  $\bar{\lambda}_f = (b_{ef} / t_f) \sqrt{R_y / E}$  - условная гибкость полки,  $b_{ef}$  - расчетная ширина свеса полки,  $t_f$  - толщина полки,  $\bar{\lambda}_{uf}$  - предельная условная гибкость полки. Расчетная ширина свеса полки  $b_{ef}$  равна расстоянию от начала внутреннего закругления до края полки для прокатного профиля и равна расстоянию от грани стенки до края полки для сварного профиля.

Предусмотрена проверка жесткости сечения путем расчета прогиба однопролетной балки от нормативных нагрузок ( $\gamma_f = 1$ ). Возможны различные варианты краевых условий. В качестве нагрузок могут задаваться сосредоточенные силы и равномерно распределенные нагрузки с произвольной длиной распределения. Условие проверки имеет вид:

$$\frac{f}{f_u} \leq 1$$

Здесь  $f$  - наибольший прогиб балки,  $f_u$  - предельное значение прогиба, определяемое через норму прогиба  $n$  и длину пролета  $l$  по формуле  $f_u = l/n$ .

Для сварных балок определяется катет поясных швов по [1], табл. 37\* или [2], табл. 40 с учетом минимально и максимально допустимых катетов угловых швов согласно [1], 12.8 или [2], 15.1.7.

В программе реализована методика подбора сечения балки, изложенная в [2], Приложение Л. В методике предполагается, что устойчивость балки обеспечена выполнением требований [2], пп. 9.4.4 – 9.4.6. По формулам, приведенным в Приложении Л, определяются размеры сечения и эффективное значение расчетного сопротивления стали. Результаты подбора по Приложению Л выводятся для сравнения с результатами подбора по алгоритму программы.

#### 4. Расчет колонны

Предусмотрены два вида расчета на прочность: расчет в пределах упругих деформаций и расчет с учетом пластических деформаций. При расчете в пределах упругих деформаций условия прочности имеют вид:

$$\frac{\sigma}{R_y \gamma_c} \leq 1$$

$$\frac{\tau}{R_s \gamma_c} \leq 1$$

Здесь  $\sigma$  - нормальное напряжение,  $\tau$  - касательное напряжение;  $R_y, R_s$  - расчетные сопротивления стали,  $\gamma_c$  - коэффициент условий работы, который принимается согласно таблице 6\* из [1] или таблице 1 из [2].

Расчет с учетом пластических деформаций проводится согласно [1], п.5.25\* или [2], п.10.1.1, если выполнены следующие условия:

$$\tau \leq 0.5 R_s$$

$$N / (A R_y) > 0.1$$

Здесь  $N$  - продольная сила,  $A$  - площадь поперечного сечения. Если для некоторого расчетного сочетания усилий указанные условия не выполняются, то для этого сочетания проводится расчет в пределах упругих деформаций.

Расчет на устойчивость колонны для чисто изгибной формы потери устойчивости проводится согласно [1], пп.5.3, 5.27\* или [2], пп.8.1.3, 10.2.2 для обеих плоскостей  $Y$  и  $Z$ . Предусмотрена отмена расчета для плоскости, в которой прогиб колонны стеснен или невозможен. Расчет на устойчивость при  $M = 0$  проводится по условию:

$$\frac{N}{\varphi A R_y \gamma_c} \leq 1$$

а при  $M \neq 0$  - по условию:

$$\frac{N}{\varphi_e A R_y \gamma_c} \leq 1$$

Коэффициент  $\varphi$  продольного изгиба вычисляется по формулам (8)-(10) из [1] или по формуле (8) из [2]. Коэффициент  $\varphi_e$  определяется на основе таблицы 74 из [1] или таблицы Ж.3 из [2] при помощи линейной интерполяции. Коэффициенты  $\varphi$  и  $\varphi_e$  зависят от гибкости  $\lambda = l_{ef} / i$ , где  $i = \sqrt{I / A}$  - радиус инерции сечения.

Для колонны двутаврового сечения и сечения, образованного из двух двутавров, предусмотрен расчет на устойчивость для изгибно-крутильной формы потери устойчивости согласно [1], пп. 5.30, 5.34 или [2], пп.10.2.4, 10.2.9. Расчет не проводится в случае, когда изгибающий момент  $M_y$  равен нулю, а также в случае, когда прогиб колонны в плоскости  $Y$  невозможен. Условия проверки имеют вид:

$$\frac{N}{c \varphi_z A R_y \gamma_c} \leq 1$$

$$\frac{N}{\varphi_{eyz} A R_y \gamma_c} \leq 1$$

Здесь  $\varphi_z$  - коэффициент продольного изгиба относительно оси  $z$ ,  $\varphi_{eyz} = \varphi_{ez} (0.6\sqrt[3]{c} + 0.4\sqrt[4]{c})$  при расчете по [1] или  $\varphi_{eyz} = c \varphi_{ez} \psi$  при расчете по [2],  $\varphi_{ez}$  - значение коэффициента  $\varphi_e$ , соответствующее изгибу относительно оси  $z$ . Если изгибающий момент  $M_z$ , действующий в плоскости  $Y$ , равен нулю, то применяется первое условие, иначе применяется второе условие.

Для двутавровых профилей проводятся проверки устойчивости стенки и полок согласно [1], пп. 7.14\*, 7.16\*, 7.23\* или [2], пп. 8.3.2, 8.3.7, 10.4.2, 10.4.3, 10.4.7. Устойчивость стенки проверяется по условию:

$$\frac{\bar{\lambda}_w}{\bar{\lambda}_{uw}} \leq 1$$

Здесь  $\bar{\lambda}_w = (h_{ef} / t_w) \sqrt{R_y / E}$  - условная гибкость стенки,  $h_{ef}$  - расчетная высота стенки,  $t_w$  - толщина стенки,  $\bar{\lambda}_{uw}$  - предельная условная гибкость стенки. Расчетная высота стенки  $h_{ef}$  равна расстоянию между началами внутренних закруглений для прокатного профиля и равна полной высоте стенки для сварного профиля.

Условие проверки устойчивости полки имеет аналогичный вид:

$$\frac{\bar{\lambda}_f}{\bar{\lambda}_{uf}} \leq 1$$

Здесь  $\bar{\lambda}_f = (b_{ef} / t_f) \sqrt{R_y / E}$  - условная гибкость полки,  $b_{ef}$  - расчетная ширина свеса полки,  $t_f$  - толщина полки,  $\bar{\lambda}_{uf}$  - предельная условная гибкость полки. Расчетная ширина свеса полки  $b_{ef}$  равна расстоянию от начала внутреннего закругления до края полки для прокатного профиля и равна расстоянию от грани стенки до края полки для сварного профиля.

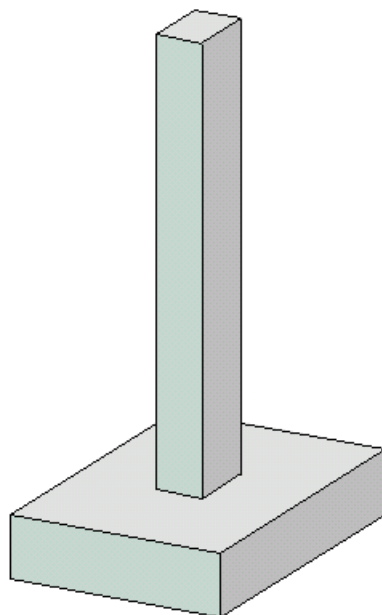
При проверке устойчивости стенок двутавров, входящих в состав сварного сечения из двух двутавров, расчетная высота стенки  $h_{ef}$  принимается равной расстоянию между началом внутреннего закругления и гранью соединительного листа, если используются прокатные двутавры, и равна расстоянию между гранью полки и гранью соединительного листа, если используются сварные двутавры.

Для сечения из двух двутавров дополнительно проводится проверка устойчивости соединительного листа. Данная проверка в основном аналогична проверке устойчивости стенки колонны двутаврового сечения. Расчетная высота  $h_{ef}$  принимается равной ширине соединительного листа  $b_l$ .

### Литература

1. СНиП II-23-81\*. Стальные конструкции/Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.
2. СП 53-102-2004. Общие правила проектирования стальных конструкций/Госстрой России. – М.: ФГУП ЦПП, 2005. – 132 с.

## 467 - Расчетные длины колонн



Программа предназначена для определения расчетных длин произвольно закрепленных стальных и железобетонных колонн переменного сечения, а также для определения усилий в колонне на основе деформированной схемы.

## 1. Расчетная схема

Расчетная схема представляет собой последовательность стержневых элементов (частей колонны) различной жесткости (рис.1). Части нумеруются в направлении снизу вверх. Возможно задание до 50 частей. При расчете применяется координатная ось  $x$ , начало которой совпадает с центром тяжести нижнего сечения колонны. Ось  $x$  направлена снизу вверх.

При статическом расчете на каждой части колонны вводится локальная ось координат, которая совпадает с линией центров тяжести сечений данной части. Возможен учет смещения оси части колонны по отношению к оси нижерасположенной части.

Предполагается, что результирующая продольная сила воспринимается в нижней опоре. Условия упругого или абсолютно жесткого закрепления могут задаваться в произвольных точках. Они формулируются для прогиба колонны и поворота сечения. На рис.3 даны формулы для определения коэффициентов жесткости упругих связей колонны с присоединенными к ней элементами конструкции (см.[2], Таблица 24). Возможен учет второстепенных шарнирно опертых колонн путем введения пружины отрицательной жесткости (рис.4).

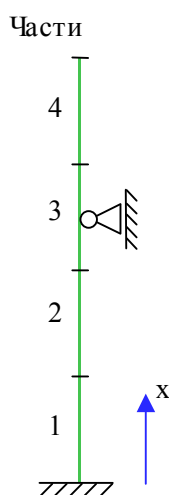


Рис. 1. Расчетная схема

## 2. Нагрузки

Предусмотрено задание сосредоточенных и равномерно распределенных продольных сил. При статическом расчете колонны дополнительно могут задаваться сосредоточенные и распределенные поперечные силы и сосредоточенные моменты. Также предусмотрено задание смещений и поворотов жестких опор. Положительные направления нагрузок показаны на рис.2. Положительное направление смещения жесткой опоры совпадает с положительным направлением поперечной силы. Положительное направление поворота жесткой опоры совпадает с положительным направлением момента.

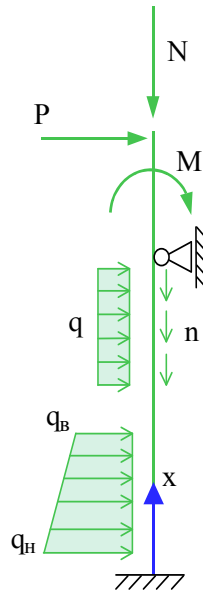


Рис. 2. Положительные направления нагрузок

### 3. Расчет

Расчетная длина (см.[1]) определяется по формуле:

$$l_{ef} = \pi \sqrt{\frac{EI}{\eta N}}$$

Здесь  $EI$  – изгибная жесткость,  $N$  – продольная сила,  $\eta = N_k / N$  – коэффициент критической нагрузки, равный отношению продольной силы при достижении критического состояния к действующей продольной силе.

Коэффициент  $\eta$  отыскивается в рамках теории упругой устойчивости для заданного распределения продольных нагрузок. Этот коэффициент является системной характеристикой колонны. При переменной изгибной жесткости или при переменной продольной силе расчетная длина также является переменной величиной.

При статическом расчете колонны решается задача о продольно-поперечном изгибе на основе следующей линейной системы обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dw}{dx} &= \varphi \\ \frac{d\varphi}{dx} &= -\frac{M}{EI} \\ \frac{dM}{dx} &= P - N(\varphi + \varphi_0) \\ \frac{dP}{dx} &= q \end{aligned}$$

Здесь  $w$  – прогиб от нагрузок,  $\varphi$  – угол поворота сечения,  $M$  – изгибающий момент,  $P = Q + N(\varphi + \varphi_0)$ ,  $Q$  – поперечная сила,  $N$  – продольная сила,  $q$  – интенсивность распределенной поперечной нагрузки,  $w_0$  – начальный прогиб,  $\varphi_0 = dw_0 / dx$ .

При расчете по деформированной схеме предусмотрен учет влияния таких несовершенств колонны, как непрямолинейность и неvertикальность, путем задания начального прогиба по форме потери устойчивости или задания отклонения оси колонны от вертикали. Выбор в качестве формы несовершенства колонны формы потери устойчивости объясняется высокой степенью влияния этой формы при больших продольных нагрузках. Отклонение оси колонны от вертикали представляет собой поворот оси вокруг нижней точки. Выбор наиболее неблагоприятного направления (выбор знака) начального прогиба или отклонения оси колонны от вертикали осуществляется автоматически.

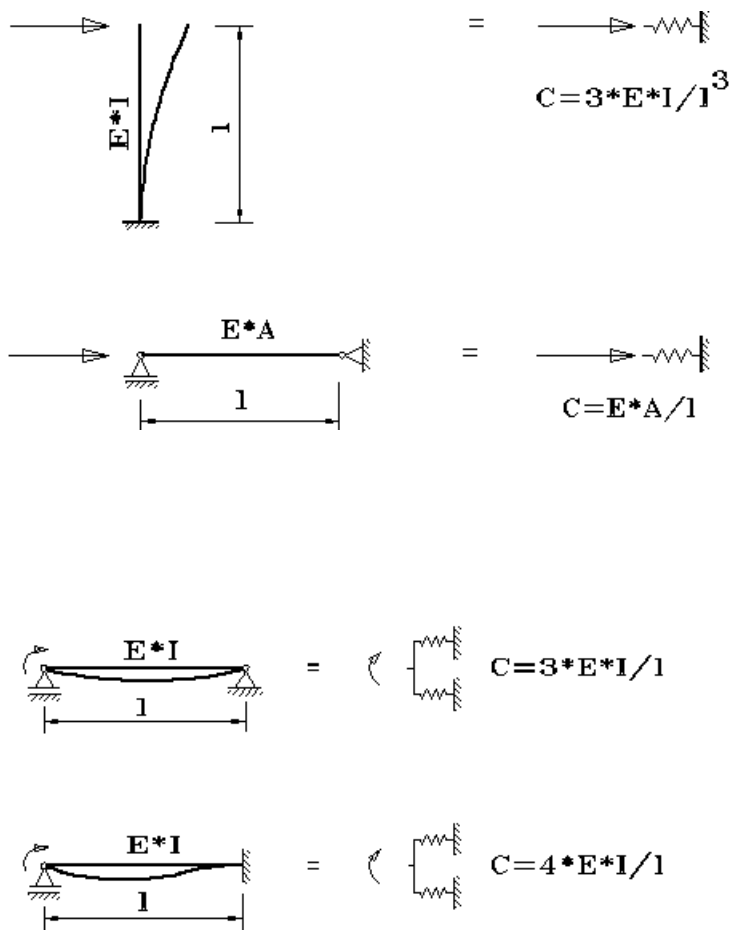


Рис. 3. Коэффициенты жесткости упругих связей

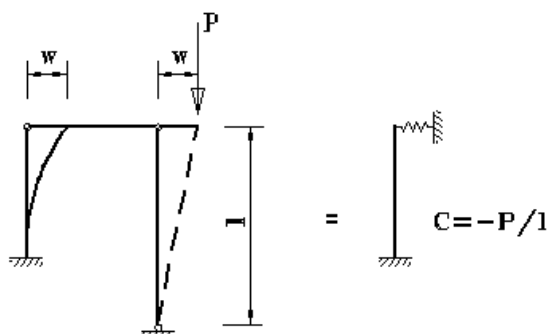


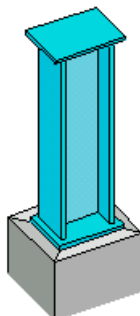
Рис. 4. Учет второстепенной колонны



## Литература

1. СНиП II-23-81\*. Стальные конструкции/Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.
2. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81\* «Стальные конструкции») /ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 148 с.

## 468 - Стальная колонна



Программа предназначена для проверки и подбора поперечного сечения стальной сплошной колонны согласно СНиП II-23-81\* [1] или СП 53-102-2004 [2]. Возможен подбор прокатного или сварного сечения. Предусмотрен расчет прогибов колонны для комбинаций нормативных нагрузок.

## 1. Расчетная схема

Расчетная схема колонны представляет собой стержневой элемент постоянного сечения. При расчете колонны применяется система координат  $xuz$ , начало которой совпадает с центром тяжести нижнего сечения колонны, ось  $z$  лежит в плоскости наибольшей жесткости колонны, ось  $x$  направлена снизу вверх (рис.1).

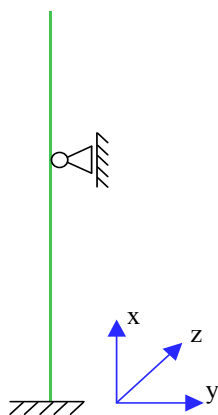


Рис. 1. Расчетная схема

Предполагается, что результирующая вертикальная сила воспринимается в нижней опоре. Условия упругого или абсолютно жесткого закрепления могут задаваться в произвольных точках. Они формулируются для прогиба колонны и поворота сечения вокруг горизонтальной оси. Возможен выбор частных расчетных схем, для которых не требуется явно задавать условия закрепления.

На рис.2 даны формулы для определения коэффициентов жесткости упругих связей колонны (см.[4], таблица 24). Возможен учет второстепенных шарнирно опертых колонн путем введения пружины отрицательной жесткости (рис.3).

## 2. Нагрузки

Возможны следующие нагрузки: сосредоточенные вертикальные и горизонтальные силы, сосредоточенные моменты, распределенные горизонтальные и вертикальные нагрузки, смещения и повороты жестких опор. Положительные направления нагрузок показаны на рис.4. Положительные направления смещений жестких опор совпадают с направлениями координатных осей. Положительные направления поворотов жестких опор совпадают с положительными направлениями моментов.

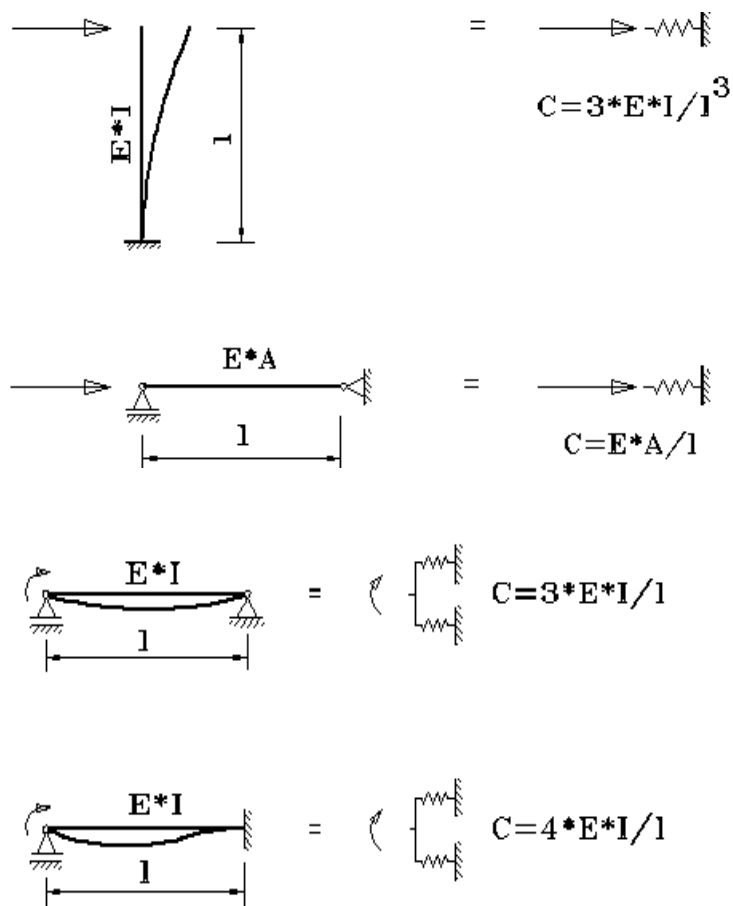


Рис. 2. Коэффициенты жесткости упругих связей

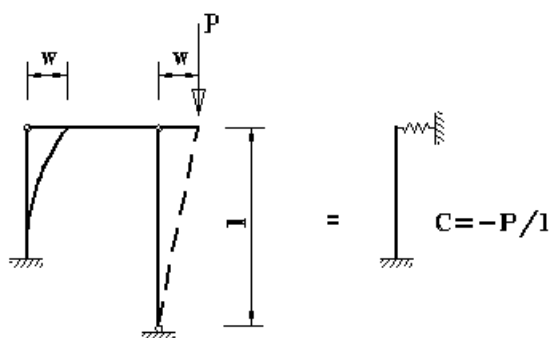


Рис. 3. Учет второстепенной колонны

Согласно СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия» [3] нагрузки подразделяются на постоянные, длительные, кратковременные и особые. Комбинирование нагрузок представляет собой генерацию множества возможных комбинаций нагрузок с учетом коэффициентов надежности по нагрузке  $\gamma_f$  и коэффициентов, связанных с одновременным учетом двух и более временных нагрузок. При наличии особых нагрузок, наряду с основными комбинациями генерируются также особые комбинации.

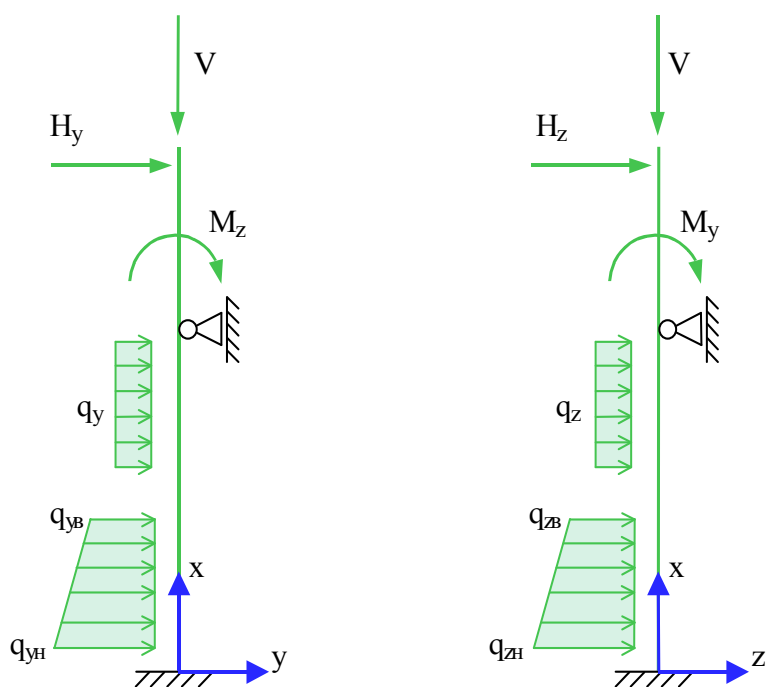


Рис. 4. Положительные направления нагрузок

Возможен ввод несочетаемых нагрузок. Такие нагрузки включаются в группу несочетаемых нагрузок. В комбинацию может войти только одна нагрузка из каждой группы. Нумерация групп начинается с единицы. Группы могут применяться, в частности, при учете ветровых нагрузок (при рассмотрении действия ветра по различным направлениям) и крановых нагрузок (при рассмотрении различных положений крана). Возможен ввод знакопеременных нагрузок. В этом случае, в расчете учитывается как заданная нагрузка, так и нагрузка противоположного знака.

Возможен ввод готовых расчетных комбинаций нагрузок. Задаваемая как вид нагрузки расчетная комбинация добавляется к множеству сгенерированных основных комбинаций нагрузок. В частности, возможен ввод лишь готовых комбинаций нагрузок.

### 3. Сечение

Возможно задание следующих прокатных профилей: двутавр колонный (по СТО АСЧМ 20-93 или ГОСТ 26020-83), двутавр широкополочный (по СТО АСЧМ 20-93 или ГОСТ 26020-83), двутавр балочный (по СТО АСЧМ 20-93 или ГОСТ 26020-83), двутавр обычный (по ГОСТ 8239-89), профиль замкнутый квадратный (по ГОСТ 12336-66), профиль замкнутый прямоугольный (по ГОСТ 12336-66), труба бесшовная горячекатаная (по ГОСТ 8732-78\*), труба электросварная (по ГОСТ 10704-91).

Возможно задание следующих сварных сечений: двутавровое сечение, сечение из двух прокатных двутавров, сечение из двух сварных двутавров. Сечения второго и третьего вида образуются из двух одинаковых двутавров путем их соединения листом в плоскости меньшей жесткости двутавра.

Предусмотрены два вида расчета: проверка заданного профиля и подбор требуемого профиля. Подбор прокатного профиля производится автоматически, путем последовательной выборки профилей из заданного сортамента и проверки их несущей способности. Если при вводе исходных данных указан конкретный номер профиля, то выборка начинается с указанного номера. В противном случае, выборка начинается с первого номера сортамента.

При подборе сварного двутаврового сечения варьируются высота  $h$  и ширина  $b$  сечения, толщина стенки  $t_w$  и толщина полки  $t_f$ . Толщины принимаются из следующего ряда значений: 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 30, 32, 36, 40 (выборка из ГОСТ 19903-74\*). При этом ставятся ограничения  $t_w \leq t_f \leq 2 \cdot t_w$ . Высота и ширина сечения ограничиваются заданными минимальными и максимальными значениями:  $h_{\min} \leq h \leq h_{\max}$ ,  $b_{\min} \leq b \leq b_{\max}$ . При этом рассматриваются сечения, для которых  $b \leq h$ . При подборе все сечения, удовлетворяющие указанным ограничениям, сортируются в порядке увеличения их площади. Из полученного ряда сечений выбирается то первое сечение, для которого выполняются все предусмотренные проверки по прочности и устойчивости. При неполном подборе толщины  $t_w$  и  $t_f$  задаются произвольными значениями, находящимися в пределах от 4мм до 40мм.

Подбор сварного сечения, образованного из двух прокатных двутавров, заключается в подборе прокатного двутавра из заданного сортамента и подборе размеров листа, соединяющего двутавры. Возможен выбор профиля из сортаментов колонных, широкополочных и балочных двутавров. Толщина соединительного листа  $t_d$  принимается из вышеуказанного ряда значений. Ширина листа  $b_d$  принимается не меньшей, чем сумма удвоенной ширины свеса полки и расстояния между полками  $a_f$ . Расстояние  $a_f$  ограничивается заданными минимальным и максимальным значениями:  $a_{f,\min} \leq a_f \leq a_{f,\max}$ . При неполном подборе толщина  $t_d$  задается произвольным значением, находящимся в пределах от 4мм до 40мм.

Подбор сварного сечения, образованного из двух сварных двутавров, состоит в подборе сварного двутавра и подборе размеров соединительного листа, которые производятся аналогично описанному выше. Дополнительно ставятся следующие ограничения:  $t_d \leq t_w \leq 2 \cdot t_d$ .

#### 4. Расчет на прочность и устойчивость

Расчет усилий в колонне проводится по недеформированной схеме. Усилия в статически неопределимой колонне при наличии упругих закреплений зависят от соотношения между изгибной жесткостью колонны и коэффициентами жесткости закреплений. Поэтому в указанном случае, при подборе требуемого профиля расчет усилий производится для каждого проверяемого профиля.

При определении расчетных усилий от комбинаций нагрузок применяется принцип суперпозиции: по усилиям от отдельных нагрузок вычисляются усилия от расчетных комбинаций нагрузок. Для проверок прочности и устойчивости колонны производится выбор расчетных комбинаций нагрузок по наибольшим значениям продольной силы  $N$ , изгибающих моментов  $M_y, M_z$ , суммарного момента  $M = \sqrt{M_y^2 + M_z^2}$ , поперечных сил  $Q_y, Q_z$ , а также эксцентриситетов  $e_z = M_y / N$ ,  $e_y = M_z / N$ ,  $e = M / N$ . При этом повторяющиеся комбинации исключаются. Выбор расчетных комбинаций производится для каждого из участков колонны, на которые она делится точками закреплений и точками приложения нагрузок. Для каждой выбранной комбинации нагрузок решается задача об устойчивости сжатого стержня. При помощи численного метода определяется коэффициент критической нагрузки, который служит для вычисления расчетных длин в плоскостях  $Y$  и  $Z$ .

Предусмотрены два вида расчета на прочность: расчет в пределах упругих деформаций и расчет с учетом пластических деформаций. При расчете в пределах упругих деформаций условия прочности имеют вид:

$$\frac{\sigma}{R_y \gamma_c} \leq 1$$

$$\frac{\tau}{R_s \gamma_c} \leq 1$$

Здесь  $\sigma$  - нормальное напряжение,  $\tau$  - касательное напряжение;  $R_y, R_s$  - расчетные сопротивления стали,  $\gamma_c$  - коэффициент условий работы, который принимается согласно таблице 6\* из [1] или таблице 1 из [2].

Расчет с учетом пластических деформаций проводится согласно [1], п.5.25\* или [2], п.10.1.1, если выполнены следующие условия:

$$\tau \leq 0.5R_s$$

$$N/(AR_y) > 0.1$$

Здесь  $A$  - площадь поперечного сечения. Если для некоторого расчетного сочетания усилий указанные условия не выполняются, то для этого сочетания проводится расчет в пределах упругих деформаций.

Расчет на устойчивость колонны для чисто изгибной формы потери устойчивости проводится согласно [1], пп.5.3, 5.27\* или [2], пп.8.1.3, 10.2.2 для обеих плоскостей  $Y$  и  $Z$ . Предусмотрена отмена расчета для плоскости, в которой прогиб колонны стеснен или невозможен. Расчет на устойчивость при  $M = 0$  проводится по условию:

$$\frac{N}{\varphi AR_y \gamma_c} \leq 1$$

а при  $M \neq 0$  - по условию:

$$\frac{N}{\varphi_e AR_y \gamma_c} \leq 1$$

Коэффициент  $\varphi$  продольного изгиба вычисляется по формулам (8)-(10) из [1] или по формуле (8) из [2]. Коэффициент  $\varphi_e$  определяется на основе таблицы 74 из [1] или таблицы Ж.3 из [2] при помощи линейной интерполяции. Коэффициенты  $\varphi$  и  $\varphi_e$  зависят от гибкости  $\lambda = l_{ef} / i$ , где  $i = \sqrt{I/A}$  - радиус инерции сечения. Расчетная длина  $l_{ef}$  для каждой плоскости определяется по формуле:

$$l_{ef} = \pi \sqrt{\frac{EI}{\eta_k N}}$$

Здесь  $EI$  - изгибная жесткость в рассматриваемой плоскости,  $\eta_k = N_k / N$  - коэффициент критической нагрузки, равный отношению продольной силы при достижении критического состояния к действующей продольной силе. Коэффициент  $\eta_k$  отыскивается для распределения продольной силы, соответствующего рассматриваемой расчетной комбинации нагрузок. При переменной продольной силе расчетная длина также является переменной величиной. Для каждого расчетного сочетания усилий принимается расчетная длина, вычисленная по указанной формуле в соответствующей точке.

Для колонны двутаврового сечения и сечения, образованного из двух двутавров, предусмотрен расчет на устойчивость для изгибно-крутильной формы потери устойчивости согласно [1], пп. 5.30, 5.34 или [2], пп.10.2.4, 10.2.9. Расчет не проводится в случае, когда изгибающий момент  $M_y$  равен нулю, а также в случае, когда прогиб колонны в плоскости  $Y$  невозможен. Условия проверки имеют вид:

$$\frac{N}{c\varphi_z AR_y \gamma_c} \leq 1$$

$$\frac{N}{\varphi_{eyz} AR_y \gamma_c} \leq 1$$

Здесь  $\varphi_z$  - коэффициент продольного изгиба относительно оси  $z$ ,  $\varphi_{eyz} = \varphi_{ez} (0.6\sqrt[3]{c} + 0.4\sqrt[4]{c})$  при расчете по [1] или  $\varphi_{eyz} = c\varphi_{ez}\psi$  при расчете по [2],  $\varphi_{ez}$  - значение коэффициента  $\varphi_e$ , соответствующее изгибу относительно оси  $z$ . Если изгибающий момент  $M_z$ , действующий в плоскости  $Y$ , равен нулю, то применяется первое условие, иначе применяется второе условие.

Для двутавровых профилей проводятся проверки устойчивости стенки и полок согласно [1], пп.7.14\*, 7.16\*, 7.23\* или [2], пп.8.3.2, 8.3.7, 10.4.2, 10.4.3, 10.4.7. Устойчивость стенки проверяется по условию:

$$\frac{\bar{\lambda}_w}{\bar{\lambda}_{uw}} \leq 1$$

Здесь  $\bar{\lambda}_w = (h_{ef} / t_w) \sqrt{R_y / E}$  - условная гибкость стенки,  $h_{ef}$  - расчетная высота стенки,  $t_w$  - толщина стенки,  $\bar{\lambda}_{uw}$  - предельная условная гибкость стенки. Расчетная высота стенки  $h_{ef}$  равна расстоянию между началами внутренних закруглений при расчете прокатного профиля и равна полной высоте стенки для сварного профиля.

Условие проверки устойчивости полки имеет аналогичный вид:

$$\frac{\bar{\lambda}_f}{\bar{\lambda}_{uf}} \leq 1$$

Здесь  $\bar{\lambda}_f = (b_{ef} / t_f) \sqrt{R_y / E}$  - условная гибкость полки,  $b_{ef}$  - расчетная ширина свеса полки,  $t_f$  - толщина полки,  $\bar{\lambda}_{uf}$  - предельная условная гибкость полки. Расчетная ширина свеса полки  $b_{ef}$  равна расстоянию от начала внутреннего закругления до края полки для прокатного профиля и равна расстоянию от грани стенки до края полки для сварного профиля.

При проверке устойчивости стенок двутавров, входящих в состав сварного сечения из двух двутавров, расчетная высота стенки  $h_{ef}$  принимается равной расстоянию между началом внутреннего закругления и гранью соединительного листа, если используются прокатные двутавры, и равна расстоянию между гранью полки и гранью соединительного листа, если используются сварные двутавры.

Для сечения из двух двутавров дополнительно проводится проверка устойчивости соединительного листа. Данная проверка в основном аналогична проверке устойчивости стенки колонны двутаврового сечения. Расчетная высота  $h_{ef}$  принимается равной ширине соединительного листа  $b_l$ .

## 5. Расчет прогибов

Расчет прогибов колонны проводится после подбора требуемого сечения. Прогибы в плоскостях  $Y$  и  $Z$  определяются для основных комбинаций нормативных нагрузок ( $\gamma_f = 1$ ). Особые и заданные (готовые) комбинации нагрузок при расчете прогибов не учитываются. Предусмотрены два вида расчета прогибов: расчет по деформированной схеме и расчет по



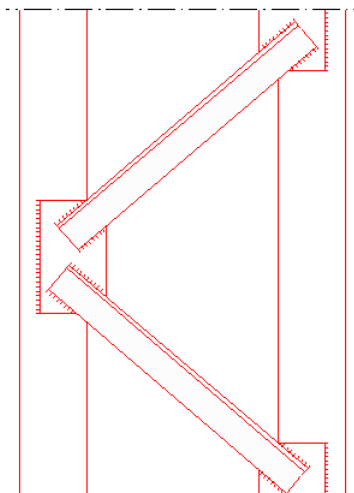
недеформированной схеме. Прогиб рассчитывается только по недеформированной схеме в той плоскости, для которой не проводится расчет на устойчивость.

В табличной форме выводятся наибольшие прогибы в плоскостях  $Y$  и  $Z$ . Предусмотрен вывод графиков прогибов для тех комбинаций нагрузок, для которых получены наибольшие прогибы.

## Литература

1. СНиП II-23-81\*. Стальные конструкции/Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.
2. СП 53-102-2004. Общие правила проектирования стальных конструкций/Госстрой России. – М.: ФГУП ЦПИ, 2005. – 132 с.
3. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1987. – 36 с.
4. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81\* «Стальные конструкции») /ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 148 с.

## 470 - Сквозная колонна



Программа предназначена для конструирования стальной сквозной двухветвевой колонны согласно СНиП II-23-81\* [1] или СП 53-102-2004 [2]. Программа производит подбор сечения ветвей колонны и соединительных элементов. В программе проводятся следующие проверки: 1) проверка прочности колонны по напряжениям, 2) проверка устойчивости колонны, 3) проверка прочности поясных швов ветвей, 4) проверка устойчивости ветвей, 5) проверка устойчивости стенок и полок ветвей, 6) проверка прочности планок по напряжениям, 7) проверка прочности сварного соединения планок с полками ветвей, 8) проверка устойчивости раскосов, 9) проверка прочности сварного соединения раскосов с полками ветвей или с узловыми фасонками, 10) проверка прочности сварного соединения фасонки с полками ветвей.

Наряду с подбором конструкции, предусмотрена проверка прочности и устойчивости заданной конструкции сквозной колонны.

## 1. Расчетная схема

Расчетная схема колонны представляет собой стержень постоянного сечения. При расчете колонны применяется система координат  $xuz$ , начало которой совпадает с центром тяжести нижнего сечения колонны, ось  $x$  направлена снизу вверх, а оси  $y, z$  - соответственно свободная и материальная оси сквозного сечения (рис.1). Плоскости осей  $y, z$  обозначаются заглавными буквами  $Y, Z$ .

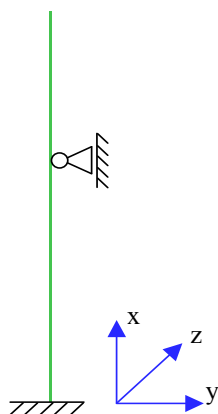


Рис. 1. Расчетная схема

Предполагается, что результирующая вертикальная сила воспринимается в нижней опоре. Условия упругого или абсолютно жесткого закрепления могут задаваться в произвольных точках. Они формулируются для прогиба колонны и поворота сечения вокруг горизонтальной оси. Возможен выбор частных расчетных схем, для которых не требуется явно задавать условия закрепления.

На рис.2 даны формулы для определения коэффициентов жесткости упругих связей колонны (см.[4], таблица 24). Возможен учет второстепенных шарнирно опертых колонн путем введения пружины отрицательной жесткости (рис.3).

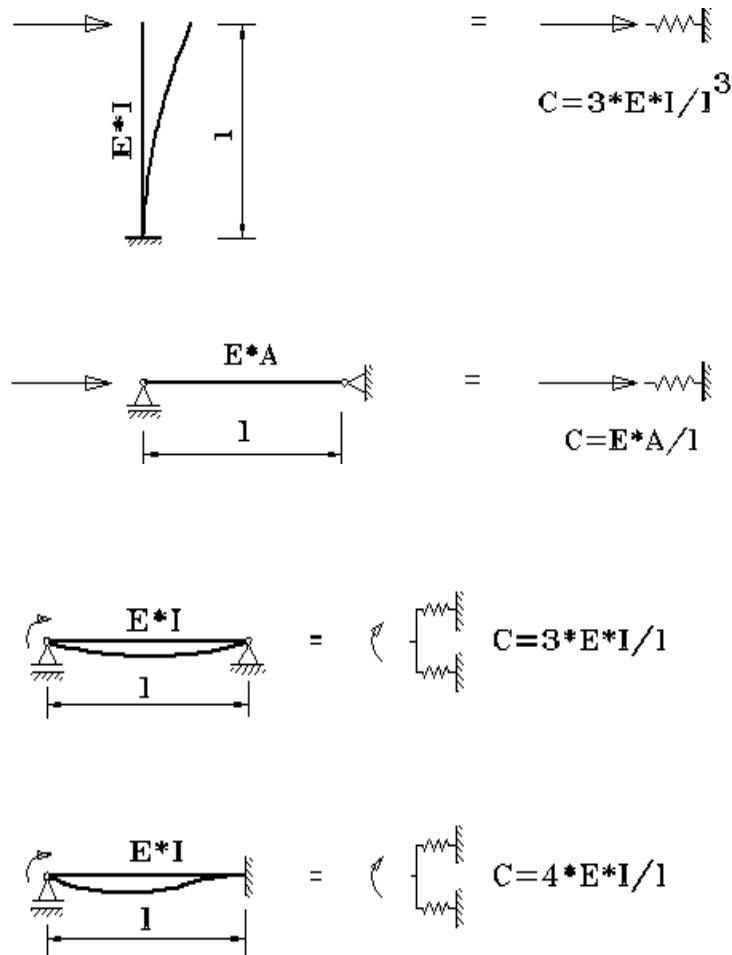


Рис. 2. Коэффициенты жесткости упругих связей

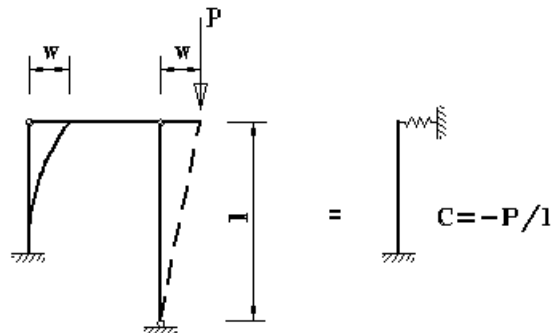


Рис. 3. Учет второстепенной колонны

## 2. Нагрузки

Рассматриваются следующие нагрузки: сосредоточенные вертикальные и горизонтальные силы, сосредоточенные моменты, распределенные горизонтальные и вертикальные нагрузки, смещения и повороты жестких опор. Положительные направления нагрузок показаны на рис.4. Положительные направления смещений жестких опор совпадают с направлениями координатных осей. Положительные направления поворотов жестких опор совпадают с положительными направлениями моментов.

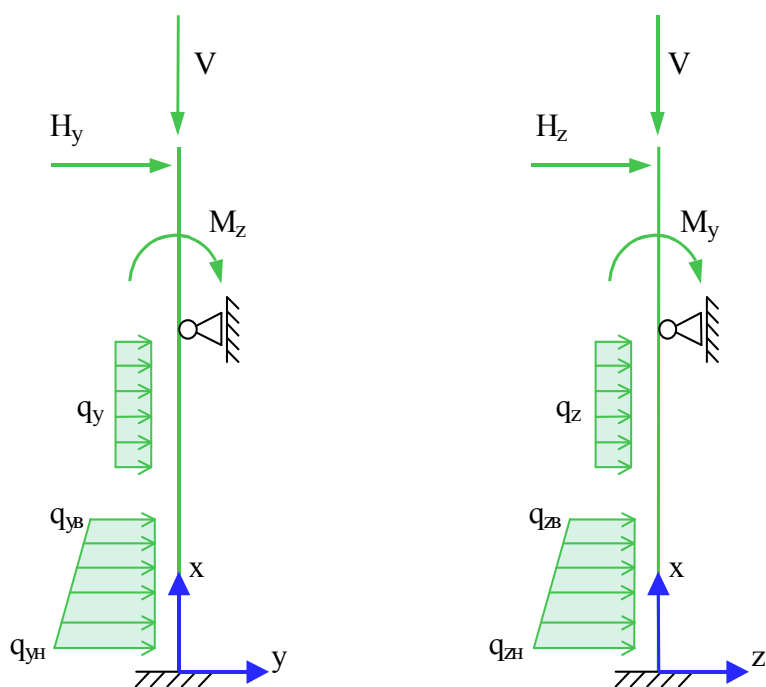


Рис. 4. Положительные направления нагрузок

Согласно СНиП 2.01.07-85 [3], нагрузки подразделяются на постоянные, длительные, кратковременные и особые. Комбинирование нагрузок представляет собой генерацию множества возможных комбинаций нагрузок с учетом коэффициентов надежности по нагрузке  $\gamma_f$  и коэффициентов, связанных с одновременным учетом двух и более временных нагрузок. При наличии особых нагрузок, наряду с основными комбинациями, генерируются также особые комбинации.

Возможен ввод несочетаемых нагрузок. Такие нагрузки включаются в группу несочетаемых нагрузок. В комбинацию может войти только одна нагрузка из каждой группы. Нумерация групп начинается с единицы. Группы могут применяться, в частности, при учете ветровых нагрузок (при рассмотрении действия ветра по различным направлениям) и крановых нагрузок (при рассмотрении различных положений крана). Возможен ввод знакопеременных нагрузок. В этом случае, в расчете учитывается как заданная нагрузка, так и нагрузка противоположного знака.

Возможен ввод готовых расчетных комбинаций нагрузок. Задаваемая как вид нагрузки расчетная комбинация добавляется к множеству сгенерированных основных комбинаций нагрузок. В частности, возможен ввод лишь готовых комбинаций нагрузок.

### 3. Сечение колонны

Рассматриваются следующие виды сквозного сечения колонны (рис.5): 1) сечение из двух швеллеров полками внутрь, 2) сечение из двух швеллеров полками наружу, 3) сечение из двух двутавров. Сечения ветвей могут быть прокатными или сварными.

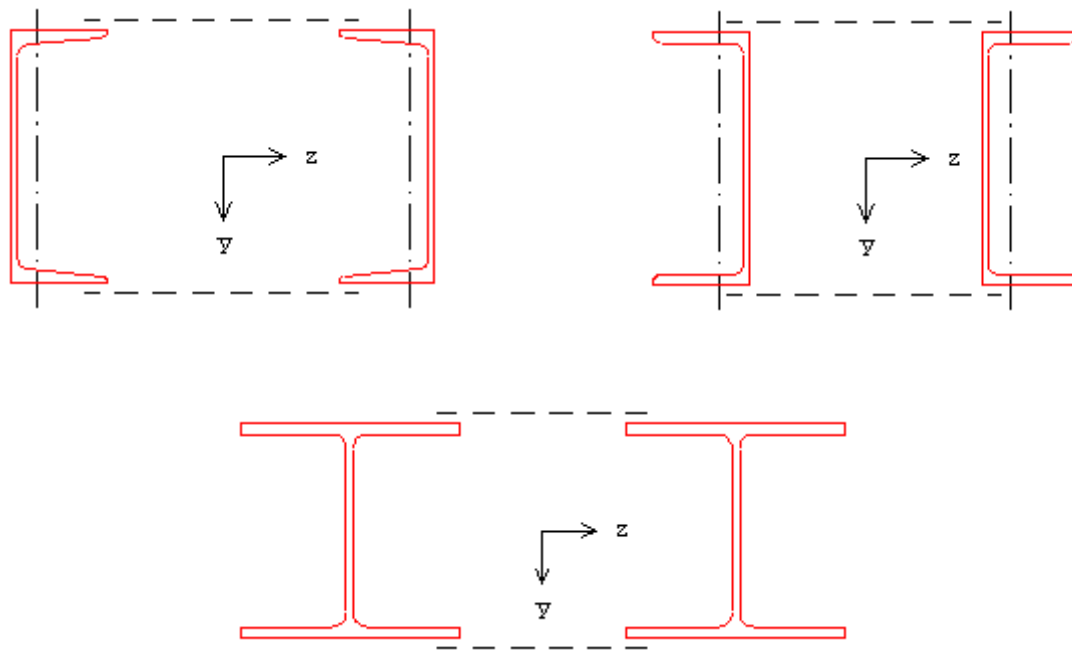


Рис. 5. Сечения сквозной колонны

Предусмотрены следующие прокатные профили: швеллеры с параллельными гранями полок и швеллеры с наклонными гранями полок по ГОСТ 8240-89, двутавры колонные, двутавры широкополочные и двутавры балочные по СТО АСЧМ 20-93 или ГОСТ 26020-83. Подбор прокатного профиля производится путем последовательной выборки профилей из заданного сортамента, компоновки сквозного сечения из выбранных профилей и проведения всех предусмотренных проверок прочности и устойчивости.

При подборе сварного сечения ветви варьируются высота  $h$  и ширина  $b$  сечения, толщина стенки  $t_w$  и толщина полок  $t_f$ . Толщины принимаются из следующего ряда значений: 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 30, 32, 36, 40 (выборка из ГОСТ 19903-74\*). При этом ставятся ограничения  $t_w \leq t_f \leq 2 \cdot t_w$ . Высота и ширина сечения ветви ограничиваются заданными минимальными и максимальными значениями:  $h_{\min} \leq h \leq h_{\max}$ ,  $b_{\min} \leq b \leq b_{\max}$ . При этом рассматриваются сечения, для которых  $b \leq h$ . Если необходимо зафиксировать один из размеров, то следует принять минимальный и максимальный размеры равными фиксированному размеру, например,  $h_{\min} = h_{\max} = h$ . При подборе все сечения, удовлетворяющие указанным ограничениям, сортируются в порядке увеличения их площади и последовательно ставятся в расчет. В программе предусмотрена возможность подбора сечения при заданных значениях  $t_w$  и  $t_f$ .

В общем случае, в качестве параметра компоновки сквозного сечения рассматривается расстояние между полками ветвей  $a_f = h_c - 2b$  ( $h_c$  - высота сквозного сечения). Значение  $a_f$  ограничивается заданными минимальным и максимальным значениями:  $a_{f,\min} \leq a_f \leq a_{f,\max}$ .

В программе предусмотрена возможность подбора сквозного сечения при фиксированной высоте  $h_c$  или при фиксированном расстоянии  $a_b$  между осями ветвей. В этом случае значение  $a_f$  может быть ограничено заданным минимальным значением:  $a_f \geq a_{f,\min}$ .

#### 4. Соединительные элементы

Для видов 1 и 3 сквозного сечения колонны соединительными элементами (рис.6) могут быть или планки, или раскосы, для вида 2 – только планки.

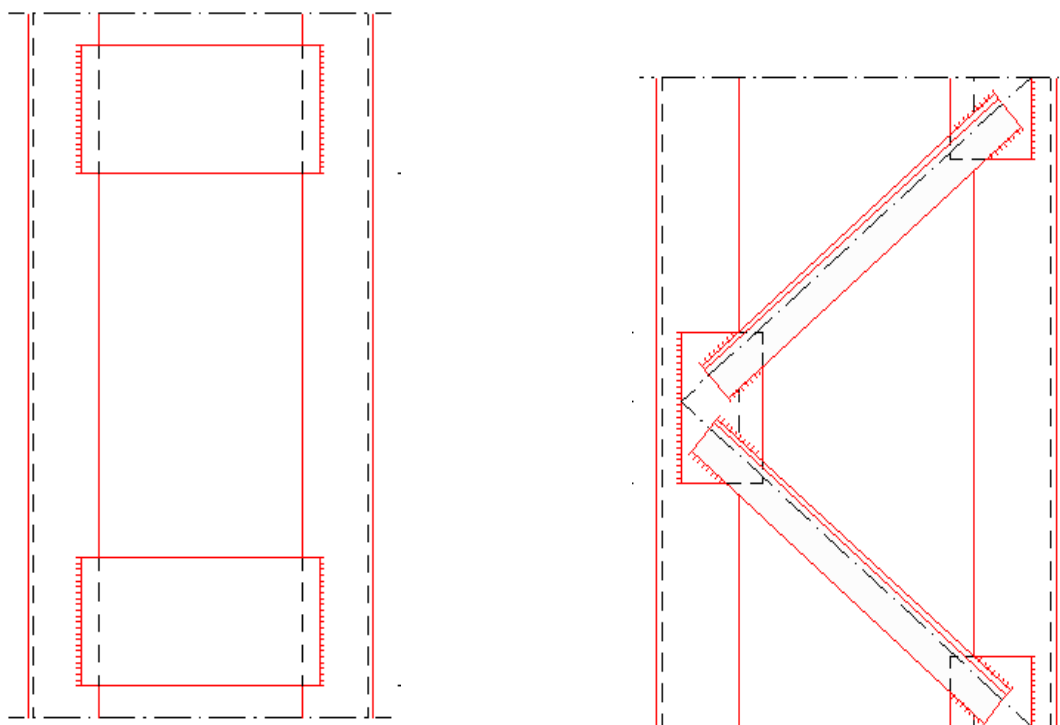


Рис. 6. Соединительные элементы

При подборе планок варьируются толщина  $t_n$  и высота  $h_n$  планок. Толщина  $t_n$  принимается из следующего ряда значений: 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 30, 32, 36, 40 (выборка из ГОСТ 19903-74\*). Высота  $h_n$  ограничивается заданным максимальным значением:

$$h \leq h_{n,\max}$$

В программе предусмотрена возможность подбора планок при заданном значении  $t_n$ .

Предусмотрены два варианта подбора расстояния  $l_b$  между осями планок. По первому варианту планки размещаются равномерно на участке заданной длины  $l$ , меньшей или равной длине колонны  $l_c$ . Переменными при подборе являются высота планок  $h_n$  и число планок  $n$  на одной грани колонны. Значение  $h_n$  принимается кратным 10мм. Расстояние  $l_b$  определяется по формуле  $l_b = (l - h_n) / n$ . По второму варианту переменными при подборе являются высота планок  $h_n$  и расстояние между осями планок  $l_b$ . Значение  $h_n$  принимается кратным 50мм, а значение  $l_b$  – кратным 10мм. В обоих случаях значение  $l_b$  может быть ограничено заданным максимальным значением:  $l_b \leq l_{b,\max}$ .

Раскосы подбираются из сортамента равнополочных уголков по ГОСТ 8509-93. При этом не рассматриваются уголки с толщиной полки  $t_p$ , меньшей 4мм, и с шириной полки  $b_p$ , большей 100мм. Предполагается, что раскосы устанавливаются обушком вверх. При конструировании соединительной решетки из раскосов учитывается требование центровки раскосов на ось ветви (точка пересечения осей двух смежных раскосов должна лежать на оси ветви), а также учитывается необходимый зазор между сварными швами смежных раскосов. В качестве зазора рассматривается расстояние  $a_c$  между двумя горизонталями, одна из которых проходит через крайнюю точку шва на пере первого (сверху) раскоса, а другая – через крайнюю точку шва на



обушке второго раскоса. Указанные требования приводят к ограничению допустимой длины раскосов  $l_p$ . Поэтому в режиме проверки заданной конструкции значение  $l_p$  не задается, а определяется внутри программы. Зазор вычисляется по формуле:

$$a_c = (\sqrt{a_b^2 + l_b^2 / 4} - l_p) \cos \alpha - (b_p + k_{fo} + k_{fn}) \sin \alpha$$

где  $\alpha$  - угол между осью ветви и осью раскоса (угол наклона раскосов равен  $90 - \alpha$ ),  $k_{fo}, k_{fn}$  - катеты швов на обушке и на пере раскоса. Угол  $\alpha$  определяется как:

$$\alpha = \arcsin \frac{a_b}{\sqrt{a_b^2 + l_b^2 / 4}}$$

Подбор расстояния  $l_b$  между узлами раскосной решетки проводится аналогично подбору расстояния между осями панелей. По первому варианту подбора расстояние между узлами решетки определяется по формуле  $l_b = l/n$  ( $n$  - число панелей решетки). По второму варианту подбора значение  $l_b$  принимается кратным 10мм. В обоих случаях значение  $l_b$  может быть ограничено заданным максимальным значением:  $l_b \leq l_{b,\max}$ .

При узких полках ветвей применяются узловые фасонки, которые привариваются к полкам ветвей внахлестку двумя угловыми швами. Толщина фасонки  $t_\phi$  принимается не менее толщины полки раскосов  $t_p$ . Ширина  $b_\phi$  и высота  $h_\phi$  фасонки подбираются по условию прочности сварного соединения раскосов с фасонками. При подборе ширины фасонки учитывается, что размер нахлестки должен быть не менее 5 толщин наиболее тонкого из свариваемых элементов. Катет швов фасонки  $k_{f\phi}$  подбирается по условию прочности сварного соединения фасонки с полками ветвей с учетом минимально и максимально допустимых катетов угловых швов согласно [1], 12.8 или [2], 15.1.7. Положение фасонки определяется по расстоянию  $a_\phi$  от края фасонки до наружной грани швеллера или до оси двутавра и по расстоянию от верхнего края фасонки до узла решетки  $a_{\phi 0}$ .

## 5. Расчет колонны

Расчет колонны включает определение усилий от заданных нагрузок, выбор расчетных комбинаций усилий и проведение проверок прочности и устойчивости.

### 5.1 Определение усилий

Определение усилий в колонне от заданных нагрузок проводится по недеформированной схеме. Так как при наличии упругих закреплений усилия в статически неопределимой колонне зависят от соотношения между изгибной жесткостью колонны и жесткостью закреплений, то в этом случае при подборе конструкции колонны определение усилий от нагрузок производится для каждой конкретной конструкции.

При определении расчетных усилий от комбинаций нагрузок применяется принцип суперпозиции: по усилиям от отдельных нагрузок вычисляются усилия от расчетных комбинаций нагрузок. Для проверок прочности и устойчивости сквозной колонны производится выбор расчетных комбинаций нагрузок по наибольшим значениям продольной силы  $N$ , изгибающих моментов  $M_y, M_z$ , суммарного момента  $M = \sqrt{M_y^2 + M_z^2}$ , поперечных сил  $Q_y, Q_z$ , а также эксцентриситетов  $e_z = M_y / N$ ,  $e_y = M_z / N$ ,  $e = M / N$ . При этом повторяющиеся комбинации исключаются. Выбор расчетных комбинаций производится для каждого из участков колонны, на которые она делится точками закреплений и точками

приложения нагрузок. Проверки устойчивости ветвей проводятся для расчетных комбинаций, которые выбраны по наибольшим значениям продольной силы  $N_b$  в ветви и изгибающего момента  $M_b$  в плоскости стенки.

## 5.2 Определение расчетных длин

Расчетная длина  $l_{ef}$  определяется по формуле:

$$l_{ef} = \pi \sqrt{\frac{EI}{\eta_k N}}$$

Здесь  $EI$  – изгибная жесткость,  $\eta_k = N_k / N$  – коэффициент критической нагрузки, равный отношению продольной силы при достижении критического состояния к действующей продольной силе. Коэффициент  $\eta_k$  отыскивается для распределения продольной силы, соответствующего рассматриваемой расчетной комбинации нагрузок. При переменной продольной силе расчетная длина также является переменной величиной. Для каждого расчетного сочетания усилий принимается расчетная длина, вычисленная по указанной формуле в соответствующей точке. Коэффициент  $\eta_k$  определяется численным методом.

Гибкость колонны определяется по формуле:

$$\lambda = l_{ef} / i$$

где  $i = \sqrt{I/A}$  – радиус инерции сечения.

## 5.3 Проверка прочности и устойчивости колонны

Расчет на прочность проводится в пределах упругих деформаций. Условия прочности имеют вид:

$$\frac{\sigma}{R_y \gamma_c} \leq 1$$

$$\frac{\tau}{R_s \gamma_c} \leq 1$$

Здесь  $\sigma$  – нормальное напряжение,  $\tau$  – касательное напряжение;  $R_y, R_s$  – расчетные сопротивления стали,  $\gamma_c$  – коэффициент условий работы, который принимается согласно таблице 6\* из [1] или таблице 1 из [2]. Наибольшее нормальное напряжение вычисляется по формуле:

$$\sigma_{\max} = \frac{N}{A} + \frac{|M_y|}{W_y} + \frac{|M_z|}{W_z}$$

Наибольшее касательное напряжение равно  $\tau_{\max} = \max(\tau_1, \tau_2)$ , где  $\tau_1$  – касательное напряжение в среднем сечении стенки,  $\tau_2$  – касательное напряжение в сечении свеса полки.

Для сварных сечений ветвей колонны проводится проверка прочности поясных швов. В случае швеллерного сечения ветвей рассматриваются односторонние угловые швы, а в случае двутаврового сечения – односторонние или двусторонние угловые швы. Сдвигающая сила в сварном соединении пояса со стенкой  $T = t_w \tau$  определяется по формуле:

$$T = \frac{|Q_z|}{I_y} A_f z_f + \frac{|Q_y|}{I_z} A_f y_f$$

Здесь  $A_f = bt_f$  - площадь сечения пояса,  $y_f, z_f$  - координаты центра тяжести сечения пояса. При односторонних угловых швах сила  $T$  воспринимается одним швом, а при двусторонних - двумя швами.

Расчет на устойчивость колонны в плоскостях  $Y, Z$  проводится согласно [1] 5.3, 5.6, 5.27\* или [2] 8.2.2, 10.2.2, 10.3.2. Условие устойчивости имеет вид:

при  $M = 0$  (формула (7) [1] или (7) [2]):

$$\frac{N}{\varphi AR_y \gamma_c} \leq 1$$

при  $M \neq 0$  (формула (51) [1] или (94) [2]):

$$\frac{N}{\varphi_e AR_y \gamma_c} \leq 1$$

Коэффициент  $\varphi$  продольного изгиба вычисляется по формулам (8)-(10) из [1] или по формуле (8) из [2] в зависимости от условной гибкости  $\bar{\lambda} = \lambda \sqrt{R_y / E}$ . При проверке устойчивости в плоскости  $Z$  (т.е. относительно свободной оси  $y$ ) коэффициент  $\varphi$  вычисляется по указанным формулам с заменой условной гибкости  $\bar{\lambda}$  на условную приведенную гибкость  $\bar{\lambda}_{ef}$ . Согласно [1], приведенная гибкость  $\lambda_{ef}$  определяется по формулам (14), (17), (20), приведенным в таблице 7 из [1], согласно [2], – по формулам (12), (15), приведенным в таблице 7 из [2].

Коэффициент  $\varphi_e$  определяется при проверке устойчивости в плоскостях  $Z$  и  $Y$  соответственно на основе таблиц 75 и 74 из [1] или таблиц Ж.4 и Ж.3 из [2] при помощи линейной интерполяции. При проверке устойчивости в плоскости  $Z$  коэффициент  $\varphi_e$  зависит от условной приведенной гибкости  $\bar{\lambda}_{ef}$  и от относительного эксцентриситета  $m = \frac{M_y}{N} \frac{Aa}{I_y}$

( $a$  принимается равным расстоянию от оси  $y$  до оси ветви, но не менее расстояния до оси стенки ветви). При проверке устойчивости в плоскости  $Y$  коэффициент  $\varphi_e$  зависит от условной гибкости  $\bar{\lambda}$  и от приведенного относительного эксцентриситета  $m_{ef} = \eta m = \eta \frac{M_z}{N} \frac{A}{W_z}$ .

Коэффициент влияния формы сечения  $\eta$  принимается согласно табл.73 [1] или табл.Ж.2 [2] для типа сечения 5.

Наряду с проверкой устойчивости проводится проверка ограничения гибкости колонны, при этом предельная гибкость определяется согласно [1], табл.19\* или [2], табл.30 по формуле  $\lambda_u = 180 - 60\alpha$ , где  $\alpha$  принимается равным левой части условия устойчивости, но не менее 0.5. В программе предусмотрена возможность задания иного значения предельной гибкости.

#### 5.4 Проверка устойчивости ветвей

При расчете ветвей колонны применяются главные оси 1 и 2 сечения ветви. Ось 1 перпендикулярна, а ось 2 параллельна плоскости стенки. Предполагается, что на участке между планками или узлами соединительной решетки ветвь испытывает сжатие и изгиб в плоскости стенки. Продольная сила в наиболее сжатой ветви и изгибающий момент вычисляются по формулам:

$$N_b = \frac{N}{2} + \frac{|M_y|}{a_b}$$

$$M_b = \frac{|M_z|}{2}$$

Проверка устойчивости ветвей колонны в плоскости  $Z$  проводится согласно [1] 5.3, или [2] 8.1.1, по условию устойчивости (формула (7) [1] или (7) [2]):

$$\frac{N_b}{\varphi A_b R_y \gamma_c} \leq 1$$

Коэффициент продольного изгиба  $\varphi$  определяется по гибкости  $\lambda_2 = l_{ef,b} / i_2$  ( $i_2 = \sqrt{I_2 / A_b}$  - радиус инерции относительно главной оси 2). Расчетная длина ветви  $l_{ef,b}$  принимается равной расстоянию между планками  $l_b - h_n$  или равной расстоянию  $l_b$  между узлами решетки. Согласно [1], гибкость  $\lambda_2$  ограничивается значением 40, если применяются планки, и значением 80, если применяются решетки. Согласно [2], условная гибкость  $\bar{\lambda}_2 = \lambda_2 \sqrt{R_y / E}$  ограничивается значением 1.4, если применяются планки, и значением 2.7, если применяются решетки. В программе предусмотрена возможность задания иного значения предельной гибкости.

При  $M_b \neq 0$  проводится проверка устойчивости плоской формы изгиба ветвей в плоскости, параллельной плоскости  $Y$ . Условие устойчивости согласно [1] 5.30 или [2] 10.2.4, имеет вид (формула (56) [1] или (96) [2]):

$$\frac{N_b}{c \varphi_2 A_b R_y \gamma_c} \leq 1$$

Коэффициент  $c$  определяется согласно [1] 5.31 или [2] 10.2.5, в зависимости от относительного эксцентриситета  $m = \frac{M_b A_b}{N_b W_2}$ . При  $m \geq 10$ :

$$c = \frac{1}{1 + m \varphi_2 / \varphi_b}$$

В этом случае, условие устойчивости преобразуется к виду (формула (46) [4]):

$$\frac{N_b}{\varphi_2 A_b R_y \gamma_c} + \frac{M_b}{\varphi_b W_1 R_y \gamma_c} \leq 1$$

Коэффициент  $\varphi_b$  определяется по [1], прил.7\* или [2], прил.М при расчетной длине  $l_{ef,b}$ .

## 5.5 Проверка устойчивости стенок и полок ветвей

Расчет на устойчивость стенок и полок ветвей колонны проводится согласно [1], 7.14\*, 7.16\*, 7.17\*, 7.22\*, 7.23\* или [2], 8.3.1, 8.3.2, 8.3.6, 8.3.7, 10.4.1, 10.4.2, 10.4.3, 10.4.7. Устойчивость стенки проверяется по условию:

$$\frac{\bar{\lambda}_w}{\lambda_{iw}} \leq 1$$

Здесь  $\bar{\lambda}_w = (h_{ef} / t_w) \sqrt{R_y / E}$  - условная гибкость стенки,  $h_{ef}$  - расчетная высота стенки,  $t_w$  - толщина стенки,  $\bar{\lambda}_{uw}$  - предельная условная гибкость стенки. Расчетная высота стенки  $h_{ef}$  равна расстоянию между началами внутренних закруглений при расчете прокатного профиля и равна полной высоте стенки при расчете сварного профиля.

Условие при проверке устойчивости полки имеет аналогичный вид:

$$\frac{\bar{\lambda}_f}{\bar{\lambda}_{uf}} \leq 1$$

Здесь  $\bar{\lambda}_f = (b_{ef} / t_f) \sqrt{R_y / E}$  - условная гибкость полки,  $b_{ef}$  - расчетная ширина свеса полки,  $t_f$  - толщина полки,  $\bar{\lambda}_{uf}$  - предельная условная гибкость полки. Расчетная ширина свеса полки  $b_{ef}$  равна расстоянию от начала внутреннего закругления до края полки при расчете прокатного профиля и равна расстоянию от грани стенки до края полки при расчете сварного профиля.

Согласно [1] 7.21\* или [2] 8.3.3, 10.4.4, в случае, если условная гибкость стенки  $\bar{\lambda}_w$  превышает значение 2.3, требуется укреплять стенки поперечными ребрами жесткости. При этом допускается устанавливать ребра жесткости только в узлах крепления соединительных элементов. В программе предусмотрена возможность ограничения условной гибкости стенки значением 2.3.

## 5.6 Расчет планок

Расчет планок включает проверку прочности планок по напряжениям и проверку прочности сварного соединения планок с полками ветвей. Проверки проводятся для расчетных комбинаций, которые выбраны по наибольшим значениям продольной силы  $N$  и поперечной силы  $Q_z$ .

Расчетная поперечная сила в колонне принимается равной  $Q = \max(Q_{fic}, |Q_z|)$ , где  $Q_{fic}$  - условная поперечная сила, определяемая согласно [1], 5.8\* или [2], 8.2.7 и принимаемая постоянной по всей длине колонны. Поперечная сила, приходящаяся на планки одной грани, равна  $Q_s = Q/2$ . Срезающая сила и изгибающий момент в планке вычисляются согласно [1], 5.9 или [2], 8.2.8 по формулам:

$$F_s = \frac{Q_s l_b}{a_b}$$

$$M_s = \frac{Q_s l_b}{2}$$

Наибольшие значения нормального и касательного напряжений в планке вычисляются по формулам:

$$\sigma = \frac{6M_s}{t_n h_n^2}$$

$$\tau = \frac{1.5F_s}{t_n h_n}$$

Условия прочности планок имеют вид:

$$\frac{\sigma}{R_y \gamma_c} \leq 1$$

$$\frac{\tau}{R_s \gamma_c} \leq 1$$

Напряжения в сварном шве определяются по формулам:

$$\tau_f = \frac{\sqrt{F_s^2 + 36M_s^2 / l_w^2}}{\beta_f k_f l_w}$$

$$\tau_z = \frac{\sqrt{F_s^2 + 36M_s^2 / l_w^2}}{\beta_z k_f l_w}$$

где  $k_f$  - катет сварного шва,  $l_w = h_n - 10$  мм - расчетная длина шва. Условия прочности сварного соединения планок с полками ветвей имеют вид:

$$\frac{\tau_f}{R_{wf} \gamma_c} \leq 1$$

$$\frac{\tau_z}{R_{wz} \gamma_c} \leq 1$$

## 5.7 Расчет раскосов

Расчет раскосов включает проверку устойчивости раскосов и проверку прочности сварного соединения раскосов с полками ветвей. Проверки проводятся для расчетных комбинаций, которые выбраны по наибольшим значениям продольной силы  $N$  и поперечной силы  $Q_z$ .

Расчетная поперечная сила в колонне принимается равной  $Q = \max(Q_{fic}, |Q_z|)$ , где  $Q_{fic}$  - условная поперечная сила, определяемая согласно [1], 5.8\* или [2], 8.2.7 и принимаемая постоянной по всей длине колонны. Поперечная сила, воспринимаемая одним раскосом, равна  $Q_p = Q/2$ . Продольная сила в раскосах вычисляется по формуле:

$$N_p = \frac{Q_p}{\sin \alpha} + N \cos^2 \alpha \frac{A_p}{A}$$

где  $A_p$  - площадь сечения раскоса. Второе слагаемое в выражении  $N_p$  учитывает сокращение длины ветви на участке длиной  $l_b/2$ . Условие устойчивости раскосов имеет вид (формула (7) [1] или (7) [2]):

$$\frac{N_p}{\varphi_p A_p R_y \gamma_{cp}} \leq 1$$

Расчетная длина раскосов принимается равной  $0.9l_p$  ( $l_p$  - длина раскосов). Коэффициент условий работы раскосов  $\gamma_{cp}$  учитывает одностороннее прикрепление раскоса из одиночного уголка.

Раскосы прикрепляются к полкам ветвей или к узловым фасонкам двумя швами. Усилия, воспринимаемые швом на обушке и швом на пере раскоса, определяются по формулам:

$$N_o = N_p \frac{b_p - z_{0p}}{b_p}$$

$$N_n = N_p \frac{z_{0p}}{b_p}$$

где  $z_{0p}$  - расстояние от наружной грани полки до центра тяжести сечения раскоса. Как в режиме подбора конструкции, так и в режиме проверки заданной конструкции катеты швов на обухе  $k_{fo}$  и на пере  $k_{fn}$  определяются внутри программы. Если раскосы прикрепляются непосредственно к полкам ветвей, то расчетные длины швов на обухе и на пере вычисляются по формулам:

$$l_{wo} = \frac{l_p - a_f / \sin \alpha}{2} - (z_{0p} + k_{fo}) \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} - 10 \text{ мм}$$

$$l_{wn} = \frac{l_p - a_f / \sin \alpha}{2} - (h_p - z_{0p} + k_{fn}) \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} - 10 \text{ мм}$$

Если раскосы прикрепляются к фасонкам, то расчетные длины швов определяются с учетом размеров фасонки. Условия прочности сварного соединения имеют вид:

$$\frac{\tau_{fo}}{R_{wf} \gamma_c} \leq 1$$

$$\frac{\tau_{zo}}{R_{wz} \gamma_c} \leq 1$$

$$\frac{\tau_{fn}}{R_{wf} \gamma_c} \leq 1$$

$$\frac{\tau_{zn}}{R_{wz} \gamma_c} \leq 1$$

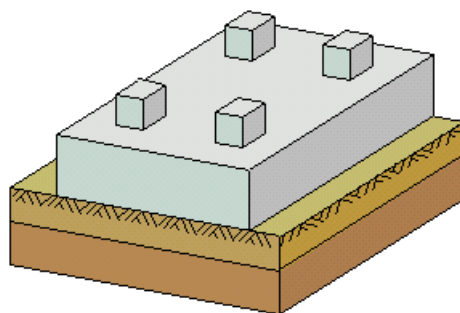
Сила, действующая на фасонку, является геометрической суммой сил, действующих со стороны растянутого и со стороны сжатого раскосов. Эта сила параллельна оси ветви и имеет величину  $2N_p \cos \alpha$ . Фасонки привариваются к полкам ветвей двумя швами, поэтому один шов воспринимает силу  $F = N_p \cos \alpha$ . Расчетная длина шва равна  $l_w = h_\phi - 10 \text{ мм}$ , причем  $l_w \leq 85 \beta_f k_f$ .

### Литература

1. СНиП II-23-81\*. Стальные конструкции/Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.
2. СП 53-102-2004. Общие правила проектирования стальных конструкций/Госстрой России. – М.: ФГУП ЦПП, 2005. – 132 с.
3. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1987. – 36 с.
4. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81\* «Стальные конструкции») /ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 148 с.



## 500 – Плитный фундамент



Программа предназначена для проектирования плитного фундамента на естественном основании согласно СНиП 2.03.01-84\* “Бетонные и железобетонные конструкции” [1], либо по СП 52-101-03 “Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры” [5], либо по СНБ 5.03.01-02 “Бетонные и железобетонные конструкции” [6] и СНиП 2.02.01-83\*, “Основания зданий и сооружений” [2]. Основание представляется в виде слоистого линейно деформируемого полупространства. При вычислении осадки применяется метод послойного суммирования, изложенный в [2], Приложение 2. Задача о совместном деформировании плиты и основания решается итерационным методом. Расчёт усилий в фундаментной плите проводится на основе линейной постановки при помощи метода конечных элементов. Определяются требуемые площади продольной и поперечной арматуры. Осуществляется конструирование продольной арматуры. Предусмотрен расчёт фундаментной плиты по трещиностойкости.

## 1. Расчётная схема

Система координат, применяемая при расчете, показана на рис.1. Фундаментная плита в плане может иметь форму прямоугольника или фигуры, полученной из прямоугольника при помощи краевых прямоугольных вырезов.

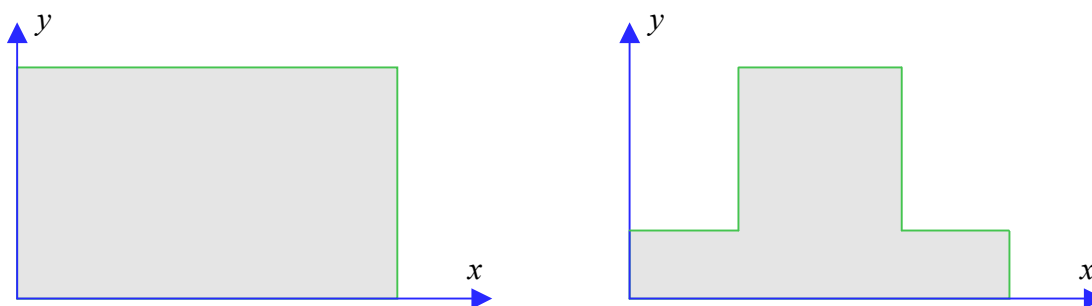


Рис. 1. Система координат

Возможно задание внутренних проёмов в плите. Расположение проёма определяется координатами вершины его левого нижнего угла.

Основание представляется в виде нескольких горизонтальных слоев, каждый из которых характеризуется толщиной и модулем деформации. Слои нумеруются в направлении от подошвы фундамента вглубь основания. Возможно задание до 20 слоев. Суммарная толщина слоев не должна превышать 200м. Предполагается, что ниже последнего заданного слоя находится абсолютно жесткий грунт.

## 2. Нагрузки

Возможны следующие нагрузки: вертикальные сосредоточенные силы, вертикальные полосовые нагрузки (нагрузки, распределенные по отрезкам), вертикальные равномерно распределенные нагрузки. Заданные сосредоточенные силы автоматически заменяются соответствующими распределёнными нагрузками, действующими в областях с центром в точках приложения сосредоточенных сил. Эта возможность позволяет точнее моделировать передачу нагрузок от колонн. Размеры областей распределения при этом должны равняться размерам колонн. Полосовые нагрузки обрабатываются аналогичным образом. Если полосовые нагрузки передаются от стен, то размеры областей распределения должны равняться размерам стен.

Нагрузки подразделяются согласно СНиП 2.01.07-85 “Нагрузки и воздействия” [3], на постоянные, длительные, кратковременные и особые. Возможен ввод до 20 нагрузок. При

расчете производится генерация множества возможных комбинаций нагрузок с учетом коэффициентов надежности по нагрузке и коэффициентов, связанных с одновременным учетом двух и более временных нагрузок. При наличии особых нагрузок, наряду с основными комбинациями, генерируются также особые комбинации.

Возможен ввод несочетаемых временных (длительных и кратковременных) нагрузок. Такие нагрузки включаются в группу несочетаемых нагрузок. В комбинацию может войти только одна нагрузка из каждой группы. Нумерация групп начинается с единицы. Группы могут применяться, в частности, для нагрузок, которые относятся к длительным нагрузкам, если берутся с пониженным нормативным значением, или относятся к кратковременным нагрузкам, если берутся с полным нормативным значением.

Возможен ввод знакопеременных временных (длительных, кратковременных и особых) нагрузок. В этом случае в расчете учитывается как заданная нагрузка, так и нагрузка противоположного знака.

### 3. Расчет усилий, осадки и давления

При расчете усилий в плите, осадки фундамента и реактивного давления грунта решается задача о совместном деформировании фундамента и основания. Решение строится при помощи итерационного метода. На текущем итерационном шаге по найденному давлению определяется осадка основания. При вычислении осадки применяется метод послойного суммирования, изложенный в [2], Приложение 2. Затем по давлению и найденной осадке рассчитывается распределение коэффициента постели. Далее решается задача об изгибе фундамента на упругом основании с переменным коэффициентом постели, и отыскиваются усилия в фундаменте и прогиб, а затем рассчитывается соответствующее распределение реактивного давления грунта. При этом возможный отрыв отдельных участков фундамента от основания не учитывается. Далее выполняется следующий итерационный шаг. Итерационный процесс оканчивается тогда, когда относительное приращение осадки становится менее 1%.

Задача об изгибе фундаментной плиты решается методом конечных элементов. Сетка конечных элементов генерируется автоматически. При помощи ввода номинального размера конечных элементов можно получать сетки различной густоты. Сосредоточенные и полосовые нагрузки учитываются в зависимости от размеров области приложения либо как узловые нагрузки, либо как распределенные по соответствующим конечным элементам.

### 4. Расчет продольной арматуры

Требуемая продольная арматура определяется в каждом узле конечноэлементной сетки для всех расчётных сочетаний усилий. Для каждого из направлений  $x$  и  $y$  расчет арматуры выполняется согласно [1], пункт 3.28\*, либо пп. 6.2.21-6.2.25 [5]. Коэффициент условий работы бетона  $\gamma_b$  принимается как произведение отдельных коэффициентов  $\gamma_{bi}$  согласно [1], таблица 15. При этом коэффициент  $\gamma_{b2}$ , зависящий от длительности действия нагрузки, определяется для каждого сочетания усилий по отдельности. Результирующий коэффициент условий работы с учетом коэффициента  $\gamma_{b2}$  не может быть менее 0,45.

При определении расчетных моментов для направлений  $x$  и  $y$  необходимо учесть крутящий момент  $M_{xy}$ . В [1] и [5] не указывается способ учёта этого момента, поэтому в программе реализованы указания из Еврокода [4]. На рис.2 представлен алгоритм учёта  $M_{xy}$  при  $M_y > M_x$ . Формулы при  $M_y < M_x$  получаются путем замены  $x \leftrightarrow y$ .

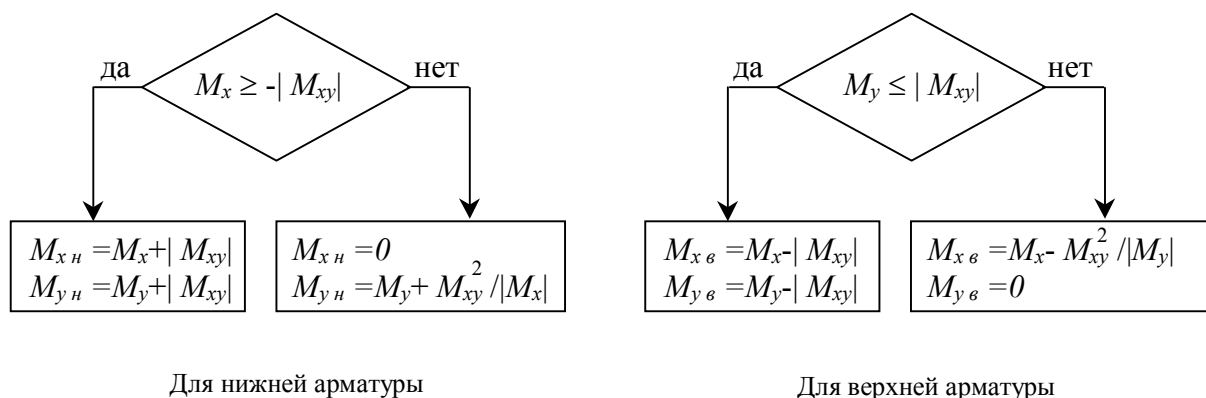


Рис. 2. Определение моментов для расчета продольной арматуры при  $M_y > M_x$

## 5. Расчет поперечной арматуры

Требуемая поперечная арматура определяется в каждом узле конечноэлементной сетки из расчёта по прочности наклонных сечений на действие поперечной силы согласно [1], пп. 3.29, 3.30, 3.31\*, 3.32, либо пп. 6.2.34 [5]. В качестве расчетного значения поперечной силы в узле принимается наибольшее значение по всем нормальным сечениям плиты, равное

$$Q = \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2}.$$

По условию (84) [1] либо 6.66 [5] определяются области плиты, в которых поперечная арматура не требуется, а по условию (72) [1] либо 6.65 [5] - области, в которых несущая способность не может быть обеспечена.

## 6. Расчёт на продавливание

Расчёт на продавливание проводится для областей приложения сосредоточенных сил в соответствии с требованиями [1], пункт 3.42, либо пп. 6.2.46-6.2.51 [5]. Продавливающая сила принимается равной расчётной силе, действующей на пирамиду продавливания, за вычетом отпора грунта. В качестве рабочей высоты сечения  $h_0$  принимается среднее значение по направлениям  $x$  и  $y$ . При построении пирамиды продавливания учитываются близкие свободные края плиты. В этом случае часть контура заменяется линиями, перпендикулярными к свободному краю плиты. Такая замена производится тогда, когда полученный контур отвечает меньшей несущей способности на продавливание (рис.3). На участках контура, которые соответствуют свободному краю плиты, усилия полагаются равными нулю.

По результатам расчёта на продавливание определяется область, внутри которой требуется поперечная арматура, и выводится максимальная плотность распределения арматуры в см<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>.

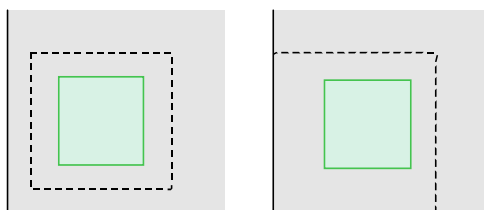


Рис. 3. Учёт близко расположенного свободного края плиты

## 7. Конструирование продольной арматуры

При конструировании верхней и нижней продольной арматуры подбирается диаметр и шаг арматурных стержней в каждом направлении  $x$  и  $y$ .

При подборе арматурных стержней применяется следующий общий ряд диаметров (в мм): 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 32, 36, 40. По классам арматурной стали могут выбираться стержни следующих диаметров: для А-I  $d = 6 - 40$ ; для А-II  $d = 10 - 40$ ; для А-III  $d = 10 - 40$ ; для А-IV  $d = 10 - 32$ ; для А500С  $d = 10 - 40$ .

## 8. Расчёт по трещиностойкости

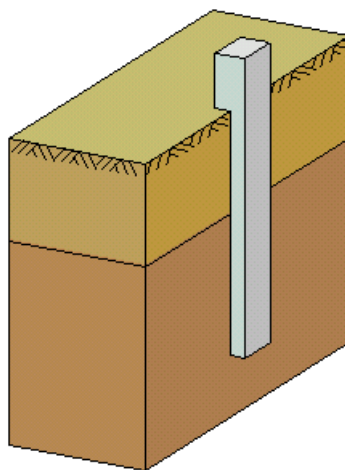
Расчет по трещиностойкости проводится для фундаментной плиты с подобранной продольной арматурой по 3-й категории требований к трещиностойкости (допускается ограниченное по ширине непродолжительное  $a_{сгс1}$  и продолжительное  $a_{сгс2}$  раскрытие трещин). Он включает расчет по образованию трещин и (при необходимости) расчет по раскрытию трещин. Расчет по трещиностойкости проводится для направлений  $x$  и  $y$  по отдельности. При этом крутящий момент учитывается так же, как при расчёте по прочности. Если условия по ширине раскрытия трещин не удовлетворяются, то подбирается арматура, обеспечивающая трещиностойкость сечения.

При расчете по трещиностойкости используются моменты от сочетаний нормативных ( $\gamma_f=1$ ) постоянных, длительных и кратковременных нагрузок и моменты от длительно действующих нагрузок.

### Литература

1. СНиП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции/Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 80 с.
2. СНиП 2.02.01-83\*. Основания зданий и сооружений/Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2002. – 48 с.
3. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия/Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1987. – 36 с.
4. Eurocode No. 2: Design of concrete structures, Part 1: General Rules and Rules for Buildings, 1989.
5. **СП 52-101-03. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры / Госстрой России. – М., 2003.**
6. СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2003. – 139 с.

## 510 - Железобетонная свая



Программа предназначена для поверочного расчёта железобетонной сваи по несущей способности грунта основания и по прочности материала сваи согласно СНиП 2.02.03-85 “Свайные фундаменты” [1] или СП 50-102-2003 “Проектирование и устройство свайных фундаментов” [6] и СНиП 2.03.01-84\* “Бетонные и железобетонные конструкции” [2] или СП 52-101-03. “Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры” [7]. Возможен расчёт как на вертикальную силу, так и на совместное действие вертикальной и горизонтальной сил и момента, при этом расчётные сочетания нагрузок определяются согласно СНиП 2.01.07-85 “Нагрузки и воздействия” [3].

## 1. Грунтовые условия

В качестве информации по грунтовым условиям необходимо задать толщины слоёв грунта и их характеристики. Допускаются следующие грунты: пылевато-глинистые, песчаные, крупнообломочные, биогенные и скальные. Грунты задаются от уровня природного рельефа. Возможен учёт планировки территории срезкой или подсыпкой. Деформационные и прочностные характеристики грунтов могут быть либо заданы непосредственно, либо автоматически принимаются согласно нормативным документам, при этом характеристики крупнообломочного грунта определяются по свойствам его заполнителя.

## 2. Свая

Рассматриваются забивные, набивные и буровые сваи. Вид сваи по условию взаимодействия с грунтом (свая-стойка, висячая свая) определяется автоматически. Допускаются сваи сплошного квадратного сечения, квадратного сечения с круглой полостью, сплошные круглые, полые круглые и сваи-оболочки.

## 3. Нагружение

Нагрузки подразделяются согласно [3] на постоянные, длительные, кратковременные и особые. Сочетания нагрузок для расчётов по I и II группам предельных состояний строятся автоматически. Возможно задание как нагрузок, так и готовых расчётных сочетаний нагрузок.

Для сейсмического воздействия должны задаваться нагрузки, которые соответствуют формам колебаний. Принимается, что сейсмическая нагрузка является знакопеременной. При наличии сейсмического воздействия в расчётном сочетании нагрузок изгибающий момент, продольная сила и боковое давление на грунт вычисляются согласно [4] по формуле:

$$N = \sqrt{\sum_{i=1}^n N_i^2}$$

где  $N_i$  - усилия, вызываемые нагрузками, которые соответствуют  $i$ -й форме колебаний конструкции,  $n$  – число учитываемых форм колебаний. Вычисленное значение  $N$  принимается с тем знаком (+ или -), который имеет наибольшее по модулю значение  $N_i$ .

Положительные направления нагрузок показаны на рис.1. Если нагрузки не задаются, то производится расчёт только несущей способности сваи на вертикальную силу.



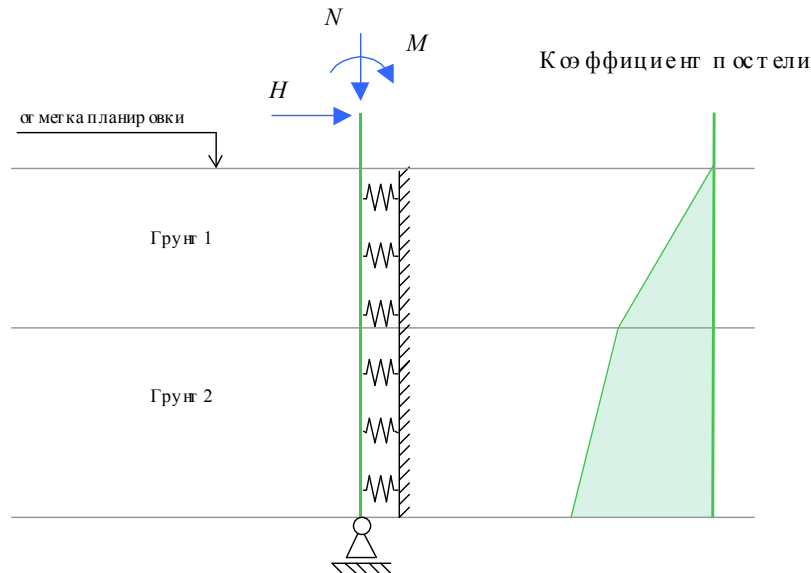


Рис. 1. Расчетная схема для расчёта сваи на совместное действие вертикальной и горизонтальной сил и момента

#### 4. Расчёт по несущей способности грунта основания сваи на вертикальную силу

Расчёт по несущей способности грунта основания сваи на вертикальную силу производится согласно [1], разделы 3, 4. Расчёт проводится на вдавливающую и, при необходимости, на выдёргивающую нагрузку. Для сочетаний нагрузок, в которые входит сейсмическая нагрузка, учитывается [1], раздел 11. При этом для вычисления расчётной глубины, до которой не учитывается сопротивление грунта на боковой поверхности сваи, используется усреднённый в пределах глубины  $l_k$  коэффициент пропорциональности  $K$  (см.[5]).

Если в пределах длины погружённой части сваи залегают напластования биогенного грунта (торфа) толщиной более 30 см, и планировка территории осуществляется подсыпкой, то учитываются отрицательные силы трения грунта на боковой поверхности сваи согласно [1], пункт 4.12.

#### 5. Расчёт на совместное действие вертикальной и горизонтальной сил и момента

Расчёт на совместное действие вертикальной и горизонтальной сил и момента проводится при расчёте по I и по II группам предельных состояний согласно [1], приложение 1. Грунт, окружающий сваю, рассматривается как линейно-деформируемая среда, характеризующая кусочно-линейным по глубине коэффициентом постели (рис.1). Образование пластических зон в грунте не допускается (однотайный расчёт). При расчёте по I группе предельных состояний, проверяется устойчивость грунта, окружающего сваю (боковое давление на грунт). При расчёте по II группе предельных состояний, определяются горизонтальное перемещение и угол поворота головы сваи. Для квадратной сваи проводится также расчёт по трещиностойкости.

При расчёте по прочности материала сваи учитывается коэффициент условий работы бетона  $\gamma_{b2}$ , зависящий от длительности нагрузки. Возможен учёт влияния прогиба согласно [2], пункт 3.24. В этом случае, расчётная длина сваи определяется согласно [1], пункт 3.7. При этом

коэффициент деформации  $\alpha_\varepsilon$ , в случае напластования нескольких грунтов, определяется через усреднённый в пределах глубины  $l_k$  коэффициент пропорциональности  $K$  (см.[5]).

## **6. Вывод результатов**

Вывод результатов расчёта осуществляется в текстовом и в графическом виде. В выходном документе предусмотрено графическое изображение грунтовых условий, сечения сваи, расчетного сопротивления на боковой поверхности сваи, изгибающего момента, бокового давления на грунт и т.д. Возможно управление объемом выводимой информации.

## Литература

1. СНиП 2.02.03-85. Свайные фундаменты/Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 48 с.
2. СНиП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции/Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 80 с.
3. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия/Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1987. – 36 с.
4. СНиП II-7-81\*. Строительство в сейсмических районах/Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2000. – 44 с.
5. Руководство по проектированию свайных фундаментов.- М.: Стройиздат, 1980.- 150 с.
6. СП 50-102-2003. Проектирование и устройство свайных фундаментов. - М.: ФГУП ЦПП, 2004.
7. СП 52-101-03. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры / Госстрой России. – М., 2003.

## 515 - Свайный фундамент с плитным ростверком



Программа предназначена для проектирования свайного фундамента с плитным ростверком согласно СП 24.13330.2011 [1], СП 50-102-2003 [2] и СНиП 2.02.03-85 [3]. Предусмотрены следующие расчеты: проверка прочности грунта основания свай, проверка допустимости давления на грунт боковыми поверхностями свай, проверка прочности материала свай, проверка допустимости горизонтального перемещения и угла поворота головы сваи, расчет по образованию и раскрытию трещин, нормальных к оси сваи, расчет на продавливание ростверка без поперечной арматуры, определение осадки и крена условного фундамента. Предусмотрен учет особенностей проектирования свайного фундамента в просадочном грунте. Предусмотрен учет сейсмических воздействий.

## 1. Фундамент

При расчете фундамента с ростверком прямоугольной формы в плане (рис.1) применяется система координат с началом в левом нижнем углу прямоугольника и осями  $x, y$ , направленными вдоль его сторон  $l_x, l_y$ . Задание плана ростверка произвольной полигональной формы (рис.2) осуществляется путем ввода координат его вершин. При этом выбор координатных осей  $x, y$  может быть произвольным. Вершины задаются в последовательности, которая соответствует обходу полигона по контуру в определенном направлении.

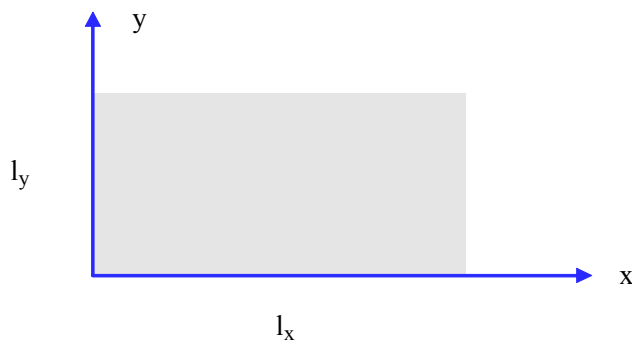


Рис.1. Ростверк прямоугольной формы

Предполагается, что все сваи фундамента одинаковы. При задании свай указывается тип свай по характеру работы в грунте (висячие сваи или сваи-стойки) и вид свай по способу заглубления в грунт (забивные, набивные или буровые сваи). Забивные сваи могут иметь следующие поперечные сечения: сплошное квадратное, квадратное с круглой полостью, сплошное круглое, круглое полое. В программе рассматриваются набивные сваи, указанные в [1], 6.4а,б; [2], 6.4а,б; [3], 2.4а,б, и буровые сваи, указанные в [1], 6.5а, [2], 6.5а,б; [3], 2.5а,б.

Для висячих свай задается глубина погружения  $l$  ( $l \geq 3$  м) нижнего конца свай, отсчитываемая от уровня подошвы ростверка. Глубина погружения забивных свай должна приниматься с учетом требований [1], 8.14, [2], 8.15, [3], 7.10, а глубина погружения буровых свай – с учетом требований [1], 7.2.7, [2], 7.2.7, [3], 4.7. При расчете предполагается, что толщина слоя грунта, принятого за основание под нижние концы свай, является достаточной для применимости формул, по которым определяется сопротивление грунта под нижними концами свай. Глубина погружения  $l$  нижнего конца свай-стоек, которая требуется при расчетах свай на выдергивающие и горизонтальные силы, определяется как сумма толщин заданных слоев грунта.

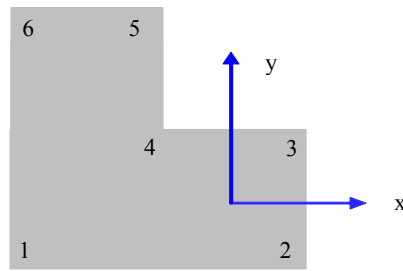


Рис.2. Ростверк полигональной формы ( $n = 6$ )

При наличии просадочного грунта, предполагается, что сваи прорезают все слои просадочного грунта и заглубляются в непросадочный грунт, для которого выполняются требования [1], 9.3, [2], 9.3, [3], 8.4.

Возможно задание шарнирного или жесткого сопряжения свай с ростверком. Вид сопряжения учитывается при расчете свай на действие горизонтальных сил. При шарнирном сопряжении, ненулевыми являются как горизонтальное перемещение  $u$ , так и угол поворота  $\psi$  головы сваи, а при жестком сопряжении отлично от нуля только горизонтальное перемещение  $u$  головы сваи.

Наряду с определением несущей способности свай при действии вертикальных нагрузок, расчетом, согласно [1], 7.2, [2], 7.2, [3], 4, предусмотрено задание несущей способности  $F_d$  при сжимающей нагрузке и несущей способности  $F_{du}$  при выдергивающей нагрузке, которые определены по результатам полевых исследований согласно [1], 7.3, [2], 7.3, [3], 5. Для свай, опирающихся нижним концом на глинистый грунт с показателем текучести  $I_L > 0.6$ , несущую способность следует определять по результатам статических испытаний свай. В грунтовых условиях II типа по просадочности, значение  $F_d$  определяется по результатам статических испытаний свай с локальным замачиванием как разность между несущей способностью сваи длиной  $l$  на вдавливающую нагрузку и несущей способностью сваи длиной  $h_{sl}$  на выдергивающую нагрузку ( $h_{sl}$  – глубина, на которой просадка грунта от собственного веса равна 5 см).

При расчете фундамента с прямоугольным ростверком, возможны следующие виды размещения свай: (1) равномерное вдоль осей  $x$  и  $y$ , (2) равномерное вдоль оси  $x$  и неравномерное вдоль оси  $y$ , (3) неравномерное вдоль оси  $x$  и равномерное вдоль оси  $y$ , (4) неравномерное. При размещении (1), рассматриваются ряды свай, центры сечений которых лежат на линиях, параллельных осям  $x$  и  $y$ . Координаты центров сечений свай определяются по заданным числам  $n_x, n_y$  свай в соответствующих рядах и расстояниям  $a_x, a_y$  от центров крайних свай рядов до ближайших сторон плана ростверка, перпендикулярных линиям рядов (рис.3). При размещении (2), рассматриваются ряды свай, линии которых параллельны оси  $x$ . Расположение линий рядов определяется по расстоянию  $a_y$  до линии первого ряда и расстояниям  $d_y$  между линиями смежных рядов. Аналогично рассматривается размещение (3).

При размещении (4), каждый ряд свай определяется путем задания координат  $x_1, y_1$  центра сечения первой сваи ряда и координат  $x_2, y_2$  центра сечения последней сваи ряда, а также задания числа  $n$  свай в ряду. При  $n = 1$  используются только значения  $x_1, y_1$ . При расчете

фундамента с ростверком произвольной полигональной формы в плане, сваи размещаются рядами аналогично (4).

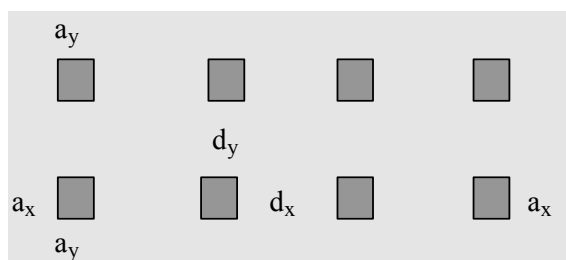


Рис.3. Размещение свай

## 2. Грунт

Грунт, расположенный под подошвой ростверка, может состоять из нескольких горизонтальных слоев с различными физико-механическими характеристиками (рис.4). Слои нумеруются в направлении от подошвы ростверка вглубь основания. Предполагается, что последний заданный слой подстилается скальным грунтом. При отсутствии скального грунта, суммарная толщина слоев должна превышать сжимаемую толщину.

Для каждого слоя грунта задается удельный вес  $\gamma_s$  твердых частиц и удельный вес  $\gamma$  грунта природной влажности. Для песчаного грунта задается коэффициент пористости  $e$ . Для глинистого грунта задаются (в %) природная влажность  $W$ , влажность на границе раскатывания  $W_p$  и влажность на границе текучести  $W_L$ . Вместо  $W_p$  и  $W_L$ , могут задаваться параметры  $I_p, I_L$ .

Коэффициент пористости грунта определяется по формуле:

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma} \left(1 + \frac{W}{100}\right) - 1$$

Удельный вес грунта в водонасыщенном состоянии определяется по формуле:

$$\gamma_{sat} = \frac{\gamma_s + e\gamma_w}{1 + e}$$





Показатель текучести глинистого грунта выражается формулой:

$$I_L = \frac{W - W_p}{W_L - W_p}$$

При учете просадочного грунта, применяется показатель текучести при водонасыщении грунта, определяемый согласно [1], (9.1), [2], (9.1), [3], (31) по формулам:

$$I_{Lsat} = \frac{ke\gamma_w / \gamma_s - w_p}{w_L - w_p}$$

$$w_p = W_p / 100$$

$$w_L = W_L / 100$$

Показатель текучести  $I_{Lsat}$  применяется также при учете примечания 8 к табл. 7.1 [2] для глинистых грунтов, имеющих степень влажности в природном состоянии  $S_r < 0.8$ .

В приведенных формулах  $\gamma_w$  - удельный вес воды ( $\gamma_w = 10 \text{ кН/м}^3$ ).

Для каждого слоя грунта задаются удельное сцепление  $c$  и угол внутреннего трения  $\varphi$ . Значения  $c$  и  $\varphi$  для грунта, залегающего ниже уровня подземных вод, но выше водоупора, должны задаваться для водонасыщенного состояния.

Для слоев грунта, расположенных ниже уровня подошвы условного фундамента ([1], 7.4.6, [2], 7.4.2, [3], 6.1), требуется задать модуль деформации  $E$ . Значение  $E$  для грунта, залегающего ниже уровня подземных вод, но выше водоупора, должно задаваться для водонасыщенного состояния. Модуль деформации грунта применяется при определении осадки и крена фундамента.

При наличии просадочного грунта, учитываются особенности расчета свайного фундамента в просадочном грунте согласно [1], 9, [2], 9, [3], 8. При вводе данных, сначала задаются один или несколько слоев просадочного грунта, а затем задаются слои непросадочного грунта. Расчет свайного фундамента производится при условии замачивания просадочного грунта сверху до полного водонасыщения. Расчетное сопротивление  $f$  на боковой поверхности сваи при расчете сваи на вертикальную нагрузку и коэффициент пропорциональности  $K$  в выражении для коэффициента постели при расчете сваи на горизонтальную нагрузку определяются при показателе текучести грунта в водонасыщенном состоянии  $I_{Lsat}$ . Удельное сцепление  $c$  и угол внутреннего трения  $\varphi$  для просадочного грунта должны задаваться для водонасыщенного состояния.

Тип грунтовых условий по просадочности определяется в зависимости от величины просадки от собственного веса грунта. В грунтовых условиях I типа, просадка от собственного веса грунта отсутствует или не превышает 5 см. В грунтовых условиях II типа, просадка от собственного веса грунта превышает 5 см. При определении типа грунтовых условий, расчетом используются зависимости относительной просадочности  $\varepsilon_{sl}$  от давления  $p$  для заданных слоев просадочного грунта (рис.5), полученные при испытаниях просадочных грунтов в компрессионном приборе согласно [10]. На основе графиков относительной просадочности вычисляется просадка грунта на уровне подошвы ростверка. Если просадка не превышает 5 см, то грунтовые условия относятся к I типу, и расчет сваи проводится аналогично расчету для непросадочного грунта, но с применением физико-механических характеристик просадочного грунта в водонасыщенном состоянии. В грунтовых условиях II типа учитывается действие на сваю негативных сил трения, возникающих при просадке околосовайного грунта. Силы трения учитываются до глубины  $h_{sl}$ , на которой просадка грунта равна 5 см. Суммарная негативная

сила трения грунта  $P_n$  учитывается с коэффициентом условий работы  $\gamma_{cn} \leq 0.8$  при проверке прочности грунта основания свай и учитывается с полным значением при проверке прочности материала свай при вертикальной нагрузке. Сопротивление  $f$  грунта на боковой поверхности висячей сваи учитывается от глубины  $h_{sl}$  до глубины погружения нижнего конца сваи  $l$ .

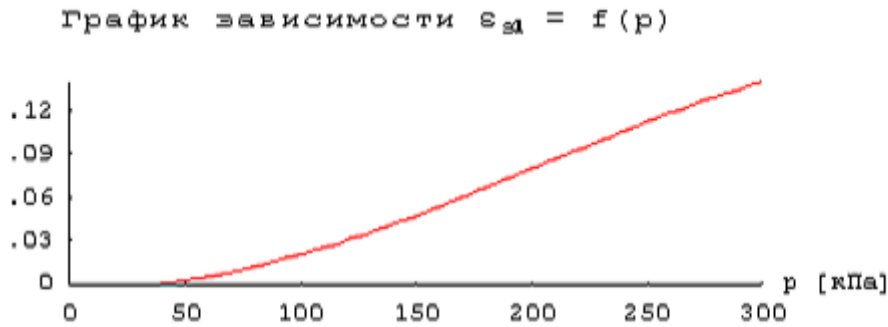


Рис.5. Пример зависимости относительной просадочности от давления

Суммарная негативная сила трения  $P_n$  может определяться расчетом или приниматься равной наибольшему предельному сопротивлению сваи длиной  $h_{sl}$ , полученному при испытаниях выдергивающей нагрузкой согласно ГОСТ 5686-78\*. При определении  $P_n$ , расчетом применяются формулы [1], 9.10, [2], 9.10, [3], 8.11:

$$P_n = u \sum_0^{h_{sl}} \tau_i h_i$$

$$\tau_i = \zeta \sigma_{zg} \operatorname{tg} \varphi_1 + c_1$$

Здесь  $u$  - периметр сечения сваи,  $\varphi_1, c_1$  - значения угла внутреннего трения и удельного сцепления. Согласно [1], параметр  $\zeta = (0.55/n)(1+z)^{-0.5}$ , где  $n$  - пористость грунта,  $n = e/(1+e)$ . Согласно [2] и [3], параметр  $\zeta = 0.7$ , значения  $\varphi_1, c_1$  осредняются по глубине  $h_{sl}$ , расчетное сопротивление  $\tau_i$  при  $z \geq 6$ м принимается постоянным и равным  $\tau_i$  на глубине 6м.

### 3. Нагрузки

Возможны следующие нагрузки на фундамент: сосредоточенные нагрузки и нагрузки, распределенные по отрезкам. Сосредоточенная нагрузка состоит из вертикальной силы  $N$ , горизонтальных сил  $H_x, H_y$  и моментов  $M_x, M_y$ , которые приложены в точке  $x, y$  на верхней поверхности ростверка. Вертикальная сила положительна, если она действует сверху вниз. Горизонтальная сила положительна, если она действует в положительном направлении соответствующей координатной оси. Положительные направления моментов совпадают с направлениями моментов горизонтальных сил относительно осей координат в плоскости подошвы ростверка (рис.6). Нагрузка, распределенная на отрезке  $[(x_1, y_1), (x_2, y_2)]$ , характеризуется погонными значениями вертикальной силы  $n$ , горизонтальных сил  $h_x, h_y$  и моментов  $m_x, m_y$ .

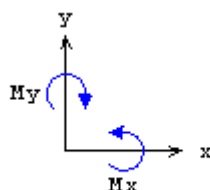


Рис.6. Положительные направления моментов

Классификация и комбинирование нагрузок принимаются согласно [4] или [5]. Нагрузки подразделяются на постоянные, длительные, кратковременные, особые и сейсмические. Комбинирование нагрузок представляет собой генерацию множества возможных комбинаций нагрузок с учетом коэффициентов надежности по нагрузке  $\gamma_f$  и коэффициентов, связанных с одновременным учетом двух и более временных нагрузок. При наличии особых и/или сейсмических нагрузок, наряду с основными комбинациями, генерируются также особые комбинации.

Возможен ввод несочетаемых нагрузок. Такие нагрузки включаются в группу несочетаемых нагрузок. В комбинацию может войти только одна нагрузка из каждой группы. Нумерация групп начинается с единицы. Группы могут применяться, в частности, при учете ветровых нагрузок (при рассмотрении действия ветра по различным направлениям).

Возможен ввод знакопеременных нагрузок. В этом случае, в расчете учитывается как заданная нагрузка, так и нагрузка противоположного знака. Сейсмические нагрузки автоматически рассматриваются как знакопеременные нагрузки.

При задании сейсмического воздействия, вводятся нагрузки на фундамент, соответствующие формам колебаний. По заданным нагрузкам на фундамент определяются нагрузки на сваи  $N_i$ , соответствующие формам колебаний. Расчетное значение нагрузки на сваю вычисляется по

формуле  $N_p = \sqrt{\sum_{i=1}^n N_i^2}$ . Знак  $N_p$  принимается одинаковым со знаком  $N_{i,\max} = \max N_i$ .

Проверки по первой группе предельных состояний проводятся для расчетных ( $\gamma_f > 1$ ) основных и особых комбинаций нагрузок, а проверки по второй группе – для нормативных ( $\gamma_f = 1$ ) основных комбинаций.

Предусмотрен учет собственного веса ростверка в комбинации нагрузок. При этом в расчетных комбинациях собственный вес ростверка принимается с заданным коэффициентом надежности. Собственный вес сваи учитывается только при проверке прочности грунта основания свай. При действии сжимающей нагрузки на сваю применяется заданный коэффициент надежности  $\gamma_f > 1$ , а при действии выдергивающей нагрузки принимается  $\gamma_f = 1$ .

#### 4. Расчет свай и их оснований

При расчете свай и их оснований по предельным состояниям первой группы проводятся следующие проверки: проверка прочности грунта основания свай при действии на сваи вертикальных сил (сжимающих и выдергивающих), проверка допустимости давления на грунт боковыми поверхностями свай при действии на сваи горизонтальных сил, проверка прочности материала свай при действии на сваи вертикальных и горизонтальных сил. При расчете по предельным состояниям второй группы проводятся следующие проверки: проверка допустимости горизонтального перемещения и угла поворота головы сваи при действии горизонтальных сил, проверка трещиностойкости при действии вертикальных и горизонтальных сил.

Условия проверок представляются в виде:

$$V/V_u \leq 1$$

Здесь  $V$  - рассчитанное значение силового или деформационного фактора,  $V_u$  - его предельное значение. Отношение  $V/V_u$  рассматривается как критерий при поиске наиболее опасных комбинаций нагрузок.

При определении вертикальных нагрузок на сваи учитываются моменты горизонтальных сил относительно осей координат, лежащих в плоскости подошвы ростверка. Предполагается, что ростверк является абсолютно жестким и что размеры поперечного сечения свай малы по сравнению с размерами плана ростверка. Указанные предположения согласуются с допущениями [1], 7.1.12, [2], 7.1.12, [3], 3.11.

Горизонтальные нагрузки на сваи определяются в предположении равномерного распределения между всеми сваями горизонтальных нагрузок, действующих на фундамент. Напряженно-деформированное состояние свай и их оснований определяется путем численного решения задачи статики для стержня в упругой среде с кусочно-линейным коэффициентом постели. Краевые условия в верхнем сечении стержня соответствуют заданному виду сопряжения свай с ростверком. При рассмотрении висячих свай, нижний край стержня принимается свободным, а при рассмотрении свай-стоек, нижний край принимается закрепленным относительно горизонтального перемещения. Условия на нижнем краю могут иметь значение только в случае коротких свай.

При расчете согласно [2] или [3], предусмотрено сопоставление результатов численного решения задачи с результатами, полученными по формулам [2], прил.Д или [3], прил.1, которые применимы в случае однородного грунта. При неоднородном грунте сопоставительные расчеты по формулам проводятся для приведенного коэффициента пропорциональности  $K$ , вычисляемого по формуле (Д.5) из [2], прил.Д.

Коэффициент  $\eta_2$ , применяемый в условии проверки допустимости давления на грунт боковыми поверхностями свай, вычисляется по формулам [1], прил.В, (В.8), [2], прил.Д, (Д.17), [3], прил.1, (35):

$$\eta_{2x} = \frac{M_{yc} + M_{yt}}{\bar{n}M_{yc} + M_{yt}} \text{ при изгибе свай в плоскости оси } x$$

$$\eta_{2y} = \frac{M_{xc} + M_{xt}}{\bar{n}M_{xc} + M_{xt}} \text{ при изгибе свай в плоскости оси } y$$

Здесь  $M_c$  и  $M_t$  - моменты от постоянных и временных нагрузок, входящих в рассматриваемую комбинацию. Нагрузки учитываются с коэффициентами надежности и коэффициентами сочетаний согласно [4], 6.3-6.5 или [5], 1.12. Моменты определяются относительно осей координат, которые лежат в плоскости нижних концов свай. Начало осей совмещается с центром тяжести плана свай. В случае, когда моменты  $M_c$  и  $M_t$  имеют разные знаки, принимается  $\eta_2 = 1/\bar{n}$ .

Проверка прочности материала свай проводится согласно [6] или [7]. Предусмотрен подбор продольной арматуры в сваях по требуемой площади арматуры, определяемой расчетом по прочности для всех комбинаций нагрузок. Расстояние от контура сечения сваи до центров арматурных стержней первоначально определяется по заданному максимальному диаметру стержней и толщине защитного слоя бетона. После вычисления требуемой площади арматуры и подбора стержней, уточняется расстояние до центров стержней, и расчет повторяется. В случае свай квадратного сечения, первоначально подбор проводится для схемы армирования с четырьмя стержнями, расположенными вблизи углов сечения. Если четырех стержней

максимального диаметра недостаточно, то проводится подбор для схемы армирования с дополнительными стержнями, расположенными вблизи середин сторон сечения. В случае круглых свай, число стержней при подборе арматуры принимается не менее 6.

Предусмотрено определение длины анкеровки стержней в случае, если в голове сваи требуется продольная арматура. При этом требуемая площадь арматуры рассчитывается не только при подборе арматуры, но и при задании арматуры. Однако, в последнем случае, длина анкеровки выводится, если требуемая площадь арматуры не превышает площади заданной арматуры. Длина анкеровки, в общем случае, выводится для растянутых и для сжатых стержней.

Расчет по образованию и раскрытию трещин, нормальных к оси сваи, проводится согласно [6], 7.2.11-7.2.12 или [7], 4.5, 4.14. В случае свай квадратного сечения с полостью или свай круглого сечения, расчет по [7] не проводится, так как для этих сечений отсутствуют нормативные указания по расчету. Расчет по трещиностойкости также не проводится, если не выполняются условия прочности материала свай.

## 5. Расчет ростверка

Расчет на продавливание ростверка без поперечной арматуры проводится согласно [6], 6.2.46–6.2.52. Производится выбор угловой сваи, для которой проводится расчет на продавливание (рис.7).

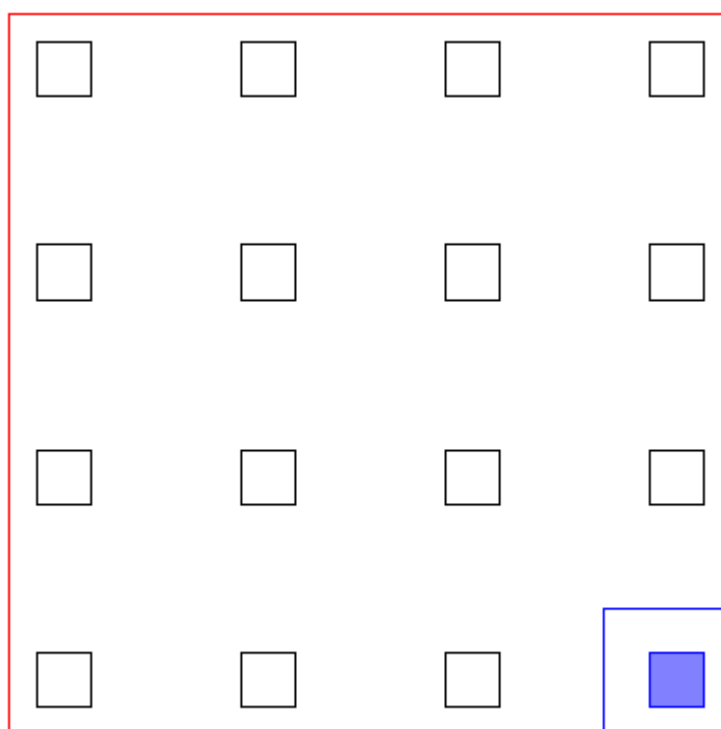


Рис.7. Пример расчетного контура

Условие прочности ростверка без поперечной арматуры имеет вид [6], (6.105):

$$\frac{F}{F_{b,ult}} + \frac{M_X}{M_{bX,ult}} + \frac{M_Y}{M_{bY,ult}} \leq 1$$

Здесь  $F$  - продавливающая сила, равная сжимающей нагрузке на сваю;  $F_{b,ult} = R_{bt} \cdot u \cdot h$  - предельная сила;  $X, Y$  - главные центральные оси расчетного контура, расположенного на расстоянии  $h/2$  от сваи;  $M_X, M_Y$  - моменты силы  $F$  относительно осей  $X, Y$ ;

$M_{bX,ult} = R_{bt} \cdot W_X \cdot h$  и  $M_{bY,ult} = R_{bt} \cdot W_Y \cdot h$  - предельные моменты;  $R_{bt}$  - расчетное сопротивление бетона при растяжении (с учетом коэффициента условий работы бетона  $\gamma_b$ );  $u$  - периметр расчетного контура;  $W_X, W_Y$  - моменты сопротивления расчетного контура относительно осей  $X, Y$ .

Данное условие преобразуется к виду:

$$\frac{|\tau|}{R_{bt}} \leq 1$$

Здесь  $\tau$  - касательное напряжение в расчетном поперечном сечении ([6], 6.2.46), распределенное по линейному закону (рис.8). Из указаний [6], 6.2.46 следует, что проверка должна производиться с учетом ограничения  $|\tau| \leq 2\tau_F$ , где  $\tau_F = \frac{F}{uh_0}$ .

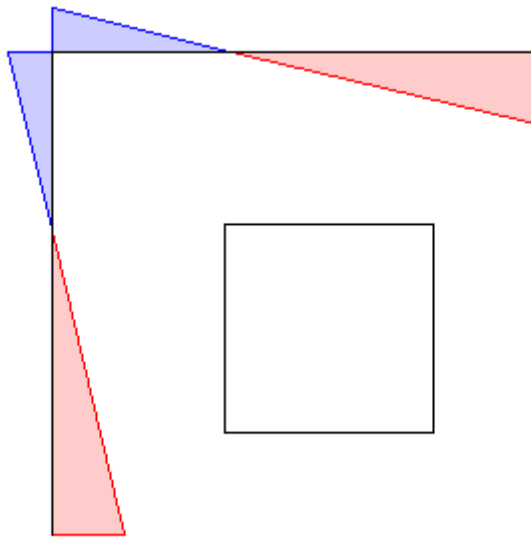


Рис.8. Пример эпюры напряжения

## 6. Расчет осадки и крена фундамента

Расчет осадки проводится для фундамента с висячими сваями и с прямоугольным ростверком. В соответствии с [1], 7.4.6, [2], 7.4.2, [3], 6.1, осадка определяется как для условного фундамента на естественном основании согласно [8] или [9]. Осадка вычисляется методом послойного суммирования. При этом проверяется, что среднее давление под подошвой фундамента  $p$  не превышает расчетного сопротивления грунта основания  $R$ .

При наличии просадочного грунта учитываются указания [1], 9.14, [2], 9.14, [3], 8.15. В грунтовых условиях II типа по просадочности, к собственному весу условного фундамента прибавляется негативная сила трения, возникающая при просадке грунта по периметру плана свай.

Крен условного фундамента определяется по формуле (5.24) [8] или (10) [9], прил.2.

## Литература

1. СП 24.13330.2011: Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85. – Минрегион России, 2010.
2. СП 50-102-2003. Проектирование и устройство свайных фундаментов / Госстрой России. – М.: ФГУП ЦПП, 2004. – 82 с.
3. СНиП 2.02.03-85. Свайные фундаменты / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 48 с.
4. СП 20.13330.2011: Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\*. – Минрегион России, 2010.
5. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1987. – 36 с.
6. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры / ГУП «НИИЖБ», ФГУП ЦПП. – М., 2004.
7. СНиП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 80 с.
8. СП 22.13330.2011: Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\*. – Минрегион России, 2010.
9. СНиП 2.02.01-83\*. Основания зданий и сооружений / Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2002. – 48 с.
10. ГОСТ 23161-78 Грунты. Метод лабораторного определения характеристик просадочности.

## 516 - Свайный фундамент с ленточным ростверком



Программа предназначена для проектирования свайного фундамента с ленточным ростверком согласно СП 24.13330.2011 [1], СП 50-102-2003 [1], СНиП 2.02.03-85 [2]. Предусмотрены следующие расчеты: проверка прочности грунта основания свай, проверка допустимости давления на грунт боковыми поверхностями свай, проверка прочности материала свай, проверка допустимости горизонтального перемещения и угла поворота головы сваи, расчет по образованию и раскрытию трещин, нормальных к оси сваи, расчет ростверка по прочности и трещиностойкости, определение осадки и крена условного фундамента. Предусмотрен учет особенностей проектирования свайного фундамента в просадочном грунте. Предусмотрен учет сейсмических воздействий.

## 1. Фундамент

Рассматривается свайный фундамент с ленточным ростверком прямоугольного поперечного сечения. Предполагается, что все сваи фундамента одинаковы. При задании свай, указывается тип свай по характеру работы в грунте (висячие сваи или сваи-стойки) и вид свай по способу заглубления в грунт (забивные, набивные или буровые сваи). Забивные сваи могут иметь следующие поперечные сечения: сплошное квадратное, квадратное с круглой полостью, сплошное круглое, круглое полое. В программе рассматриваются набивные сваи, указанные в [1], 6.4а,б; [2], 6.4а,б; [3], 2.4а,б, и буровые сваи, указанные в [1], 6.5а, [2], 6.5а,б; [3], 2.5а,б.

Для висячих свай задается глубина погружения  $l$  ( $l \geq 3$  м) нижнего конца свай, отсчитываемая от уровня подошвы ростверка. Глубина погружения забивных свай должна приниматься с учетом требований [1], 8.14, [2], 8.15, [3], 7.10, а глубина погружения буровых свай – с учетом требований [1], 7.2.7, [2], 7.2.7, [3], 4.7. При расчете предполагается, что толщина слоя грунта, принятого за основание под нижние концы свай, является достаточной для применимости формул, по которым определяется сопротивление грунта под нижними концами свай. Глубина погружения  $l$  нижнего конца свай-стоек, которая требуется при расчетах свай на выдергивающие и горизонтальные силы, определяется как сумма толщин заданных слоев грунта.

При наличии просадочного грунта, предполагается, что сваи прорезают все слои просадочного грунта и заглубляются в непросадочный грунт, для которого выполняются требования [1], 9.3, [2], 9.3, [3], 8.4.

Возможно задание  $n$  рядов свай в продольном направлении ( $n = 1, 2, 3$ ). При  $n > 1$  сваи могут размещаться рядовым или шахматным порядком (рис.1) (вид размещения свай учитывается только при расчете ростверка как многопролетной балки). Расположение свай в ряду характеризуется шагом свай  $s$ . При  $n > 1$ , положение рядов определяется по расстоянию  $a$  от грани ростверка до осей крайних свай.

При расчете фундамента с одним рядом свай предполагается, что сопряжение свай с ростверком является жестким. При этом учитывается нагружение свай моментом, действующим в поперечном направлении относительно оси ростверка. При  $n > 1$ , возможно как жесткое, так и шарнирное сопряжение. Вид сопряжения учитывается при расчете свай на действие горизонтальных сил. При шарнирном сопряжении, ненулевыми являются как горизонтальное перемещение  $u$ , так и угол поворота  $\psi$  головы сваи, а при жестком сопряжении, отлично от нуля только горизонтальное перемещение  $u$  головы сваи.

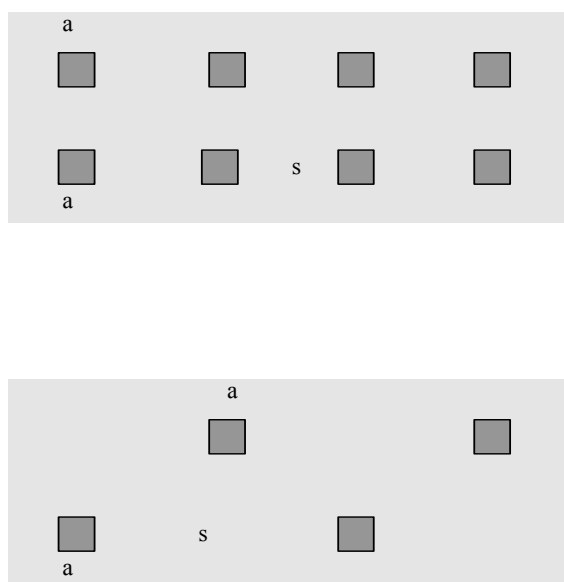


Рис. 1. Размещение свай

Наряду с определением несущей способности свай при действии вертикальных нагрузок, расчетом, согласно [1], 7.2, [1], 7.2, [2], 4, предусмотрено задание несущей способности  $F_d$  при сжимающей нагрузке и несущей способности  $F_{du}$  при выдергивающей нагрузке, которые определены по результатам полевых исследований согласно [1], 7.3, [2], 7.3, [3], 5. Для свай, опирающихся нижним концом на глинистый грунт с показателем текучести  $I_L > 0.6$ , несущую способность следует определять по результатам статических испытаний свай. В грунтовых условиях II типа по просадочности, значение  $F_d$  определяется по результатам статических испытаний свай с локальным замачиванием как разность между несущей способностью сваи длиной  $l$  на вдавливающую нагрузку и несущей способностью сваи длиной  $h_{sl}$  на выдергивающую нагрузку ( $h_{sl}$  – глубина, на которой просадка грунта от собственного веса равна 5 см).

## 2. Грунт

Грунт, расположенный под подошвой ростверка, может состоять из нескольких горизонтальных слоев с различными физико-механическими характеристиками (рис.2). Слои нумеруются в направлении от подошвы ростверка вглубь основания. Предполагается, что последний заданный слой подстилается скальным грунтом. При отсутствии скального грунта, суммарная толщина слоев должна превышать сжимаемую толщину.

Для каждого слоя грунта задается удельный вес  $\gamma_s$  твердых частиц и удельный вес  $\gamma$  грунта природной влажности. Для песчаного грунта задается коэффициент пористости  $e$ . Для глинистого грунта задаются (в %) природная влажность  $W$ , влажность на границе раскатывания  $W_p$  и влажность на границе текучести  $W_L$ . Вместо  $W_p$  и  $W_L$ , могут задаваться параметры  $I_p, I_L$ .

## Схема геологического разреза

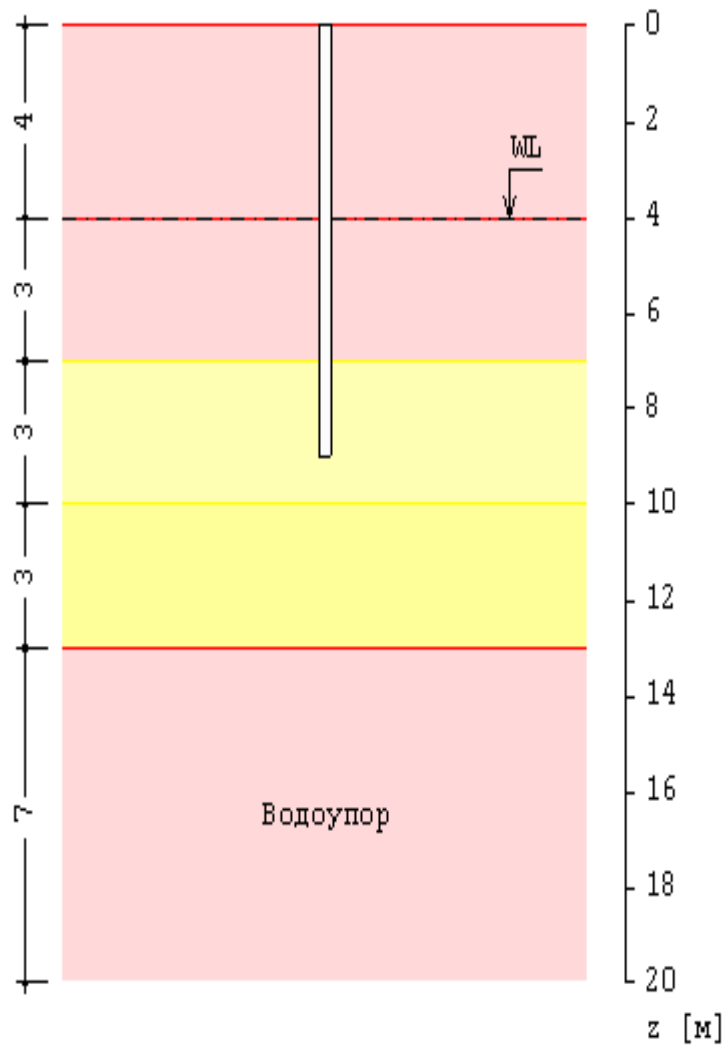


Рис.2. Пример задания грунта

Коэффициент пористости грунта определяется по формуле:

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma} \left(1 + \frac{W}{100}\right) - 1$$

Удельный вес грунта в водонасыщенном состоянии определяется по формуле:

$$\gamma_{sat} = \frac{\gamma_s + e\gamma_w}{1 + e}$$

Удельный вес грунта в водоносном слое с учетом взвешивающего действия воды определяется по формуле:

$$\gamma_{sb} = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1 + e}$$

Степень водонасыщения грунта определяется по формуле:

$$S_r = \frac{W}{100e} \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

Влажность грунта при полном водонасыщении равна (при  $S_r = 1$ ):

$$W_{sat} = 100e \frac{\gamma_w}{\gamma_s}$$

Число пластичности глинистого грунта вводится формулой:

$$I_p = W_L - W_p$$

Показатель текучести глинистого грунта выражается по формуле:

$$I_L = \frac{W - W_p}{W_L - W_p}$$

При учете просадочного грунта применяется показатель текучести при водонасыщении грунта, определяемый согласно [1], (9.1), [2], (9.1), [3], (31) по формулам:

$$I_{Lsat} = \frac{ke\gamma_w / \gamma_s - w_p}{w_L - w_p}$$

$$w_p = W_p / 100$$

$$w_L = W_L / 100$$

Показатель текучести  $I_{Lsat}$  применяется также при учете примечания 8 к табл.7.1 [2] для глинистых грунтов, имеющих степень влажности в природном состоянии  $S_r < 0.8$ .

В приведенных формулах  $\gamma_w$  - удельный вес воды ( $\gamma_w = 10 \text{ кН/м}^3$ ).

Для каждого слоя грунта задаются удельное сцепление  $c$  и угол внутреннего трения  $\varphi$ . Значения  $c$  и  $\varphi$  для грунта, залегающего ниже уровня подземных вод, но выше водоупора, должны задаваться для водонасыщенного состояния.

Для слоев грунта, расположенных ниже уровня подошвы условного фундамента ([1], 7.4.6, [2], 7.4.2, [3], 6.1), требуется задать модуль деформации  $E$ . Значение  $E$  для грунта, залегающего ниже уровня подземных вод, но выше водоупора, должно задаваться для водонасыщенного состояния. Модуль деформации грунта применяется при определении осадки и крена фундамента.

При наличии просадочного грунта, учитываются особенности расчета свайного фундамента в просадочном грунте согласно [1], 9, [2], 9, [3], 8. При вводе данных, сначала задаются один или несколько слоев просадочного грунта, а затем задаются слои непросадочного грунта. Расчет свайного фундамента производится при условии замачивания просадочного грунта сверху до полного водонасыщения. Расчетное сопротивление  $f$  на боковой поверхности сваи при расчете сваи на вертикальную нагрузку и коэффициент пропорциональности  $K$  в выражении для коэффициента постели при расчете сваи на горизонтальную нагрузку определяются при показателе текучести грунта в водонасыщенном состоянии  $I_{Lsat}$ . Удельное сцепление  $c$  и угол внутреннего трения  $\varphi$  для просадочного грунта должны задаваться для водонасыщенного состояния.

Тип грунтовых условий по просадочности определяется в зависимости от величины просадки от собственного веса грунта. В грунтовых условиях I типа, просадка от собственного веса грунта отсутствует или не превышает 5 см. В грунтовых условиях II типа, просадка от собственного веса грунта превышает 5 см. При определении типа грунтовых условий, расчетом используются зависимости относительной просадочности  $\varepsilon_{sl}$  от давления  $p$  для заданных слоев просадочного грунта (рис.3), полученные при испытаниях просадочных грунтов в компрессионном приборе согласно [10]. На основе графиков относительной просадочности вычисляется просадка грунта на уровне подошвы ростверка. Если просадка не превышает 5 см,

то грунтовые условия относятся к I типу, и расчет свай проводится аналогично расчету для непросадочного грунта, но с применением физико-механических характеристик просадочного грунта в водонасыщенном состоянии. В грунтовых условиях II типа учитывается действие на сваю негативных сил трения, возникающих при просадке околовсвайного грунта. Силы трения учитываются до глубины  $h_{sl}$ , на которой просадка грунта равна 5 см. Суммарная негативная сила трения грунта  $P_n$  учитывается с коэффициентом условий работы  $\gamma_{cn} \leq 0.8$  при проверке прочности грунта основания свай и учитывается с полным значением при проверке прочности материала свай при вертикальной нагрузке. Сопротивление  $f$  грунта на боковой поверхности висячей сваи учитывается от глубины  $h_{sl}$  до глубины погружения нижнего конца сваи  $l$ .

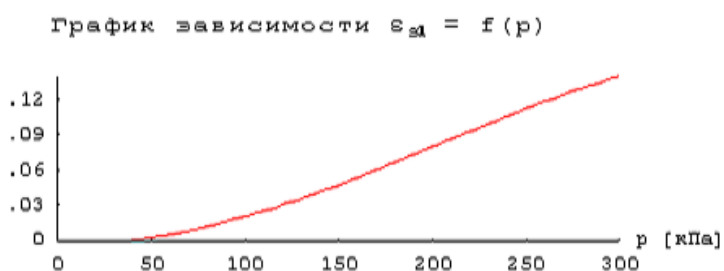


Рис.3. Пример зависимости относительной просадочности от давления

Суммарная негативная сила трения  $P_n$  может определяться расчетом или приниматься равной наибольшему предельному сопротивлению сваи длиной  $h_{sl}$ , полученному при испытаниях выдергивающей нагрузкой согласно ГОСТ 5686-78\*. При определении  $P_n$ , расчетом применяются формулы [1], 9.10, [2], 9.10, [3], 8.11:

$$P_n = u \sum_0^{h_{sl}} \tau_i h_i$$

$$\tau_i = \zeta \sigma_{zg} \operatorname{tg} \varphi_I + c_I$$

Здесь  $u$  - периметр сечения сваи,  $\varphi_I, c_I$  - значения угла внутреннего трения и удельного сцепления. Согласно [1], параметр  $\zeta = (0.55/n)(1+z)^{-0.5}$ , где  $n$  - пористость грунта,  $n = e/(1+e)$ . Согласно [2] и [3], параметр  $\zeta = 0.7$ , значения  $\varphi_I, c_I$  осредняются по глубине  $h_{sl}$ , расчетное сопротивление  $\tau_i$  при  $z \geq 6$  м принимается постоянным и равным  $\tau_i$  на глубине 6 м.

### 3. Нагрузки

Распределенная нагрузка на фундамент характеризуется погонными значениями вертикальной силы  $N$ , горизонтальной силы  $H$  и момента  $M$ . Предполагается, что вертикальная нагрузка  $N$  приложена по оси ленты. Горизонтальная сила  $H$  направлена перпендикулярно к оси ленты. Момент  $M$  определяется относительно оси ленты. Вертикальная сила положительна, если она действует сверху вниз. Положительное направление момента (рис.4) совпадает с направлением момента горизонтальной силы относительно оси в плоскости подошвы ростверка.

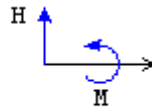


Рис.4. Положительное направление момента

Классификация и комбинирование нагрузок принимаются согласно [4] или [5]. Нагрузки подразделяются на постоянные, длительные, кратковременные, особые и сейсмические. Комбинирование нагрузок представляет собой генерацию множества возможных комбинаций нагрузок с учетом коэффициентов надежности по нагрузке  $\gamma_f$  и коэффициентов, связанных с одновременным учетом двух и более временных нагрузок. При наличии особых и/или сейсмических нагрузок, наряду с основными комбинациями, генерируются также особые комбинации.

Возможен ввод несочетаемых нагрузок. Такие нагрузки включаются в группу несочетаемых нагрузок. В комбинацию может войти только одна нагрузка из каждой группы. Нумерация групп начинается с единицы. Группы могут применяться, в частности, при учете ветровых нагрузок (при рассмотрении действия ветра по различным направлениям).

Возможен ввод знакопеременных нагрузок. В этом случае, в расчете учитывается как заданная нагрузка, так и нагрузка противоположного знака. Сейсмические нагрузки автоматически рассматриваются как знакопеременные нагрузки.

При задании сейсмического воздействия, вводятся нагрузки на фундамент, соответствующие формам колебаний. По заданным нагрузкам на фундамент определяются нагрузки на сваи  $N_i$ , соответствующие формам колебаний. Расчетное значение нагрузки на сваю вычисляется по

формуле  $N_p = \sqrt{\sum_{i=1}^n N_i^2}$ . Знак  $N_p$  принимается одинаковым со знаком  $N_{i,\max} = \max N_i$ .

Проверки по первой группе предельных состояний проводятся для расчетных ( $\gamma_f > 1$ ) основных и особых комбинаций нагрузок, а проверки по второй группе – для нормативных ( $\gamma_f = 1$ ) основных комбинаций.

Предусмотрен учет собственного веса ростверка в комбинации нагрузок. При этом в расчетных комбинациях собственный вес ростверка принимается с заданным коэффициентом надежности. Собственный вес свай учитывается только при проверке прочности грунта основания свай. При действии сжимающей нагрузки на сваю, применяется заданный коэффициент надежности  $\gamma_f > 1$ , а при действии выдергивающей нагрузки, принимается  $\gamma_f = 1$ .

#### 4. Расчет свай и их оснований

При расчете свай и их оснований по предельным состояниям первой группы, проводятся следующие проверки: проверка прочности грунта основания свай при действии на сваи вертикальных сил (сжимающих и выдергивающих), проверка допустимости давления на грунт боковыми поверхностями свай при действии на сваи горизонтальных сил и моментов, проверка прочности материала свай при действии на сваи вертикальных сил, горизонтальных сил и моментов. При расчете по предельным состояниям второй группы, проводятся следующие проверки: проверка допустимости горизонтального перемещения и угла поворота головы свай при действии горизонтальных сил и моментов, проверка трещиностойкости при действии вертикальных сил, горизонтальных сил и моментов.

Условия проверок представляются в виде:

$$V/V_u \leq 1$$

Здесь  $V$  - рассчитанное значение силового или деформационного фактора,  $V_u$  - его предельное значение. Отношение  $V/V_u$  рассматривается как критерий при поиске наиболее опасных комбинаций нагрузок.

При определении вертикальных нагрузок на сваи учитываются моменты горизонтальных сил относительно оси, лежащей в плоскости подошвы ростверка. Предполагается, что ростверк является абсолютно жестким в поперечном направлении. В случае фундамента с несколькими рядами свай, предполагается, что размеры поперечного сечения свай малы по сравнению с шириной поперечного сечения ростверка. Указанные предположения согласуются с допущениями [1], 7.1.12, [2], 7.1.12, [3], 3.11.

Горизонтальные нагрузки на сваи определяются в предположении равномерного распределения между всеми сваями горизонтальных нагрузок, действующих на фундамент. Напряженно-деформированное состояние свай и их оснований определяется путем численного решения задачи статики для стержня в упругой среде с кусочно-линейным коэффициентом постели. Краевые условия в верхнем сечении стержня соответствуют заданному виду сопряжения сваи с ростверком. При рассмотрении висячих свай, нижний край стержня принимается свободным, а при рассмотрении свай-стоек, нижний край принимается закрепленным относительно горизонтального перемещения. Условия на нижнем краю могут иметь значение только в случае коротких свай.

Коэффициент  $\eta_2$ , применяемый в условии проверки допустимости давления на грунт боковыми поверхностями свай, вычисляется по формулам [1], прил.В, (В.8), [2], прил.Д, (Д.17), [3], прил.1, (35):

$$\eta_2 = \frac{M_c + M_t}{\bar{n}M_c + M_t}$$

Здесь  $M_c$  и  $M_t$  - моменты от постоянных и временных нагрузок, входящих в рассматриваемую комбинацию. Нагрузки учитываются с коэффициентами надежности и коэффициентами сочетаний согласно [4], 6.3-6.5 или [5], 1.12. Моменты определяются относительно оси, лежащей в плоскости нижних концов свай. В случае, когда моменты  $M_c$  и  $M_t$  имеют разные знаки, принимается  $\eta_2 = 1/\bar{n}$ .

Проверка прочности материала свай проводится согласно [6] или [7]. Предусмотрен подбор продольной арматуры в сваях по требуемой площади арматуры, определяемой расчетом по прочности для всех комбинаций нагрузок. Расстояние от контура сечения сваи до центров арматурных стержней первоначально определяется по заданному максимальному диаметру стержней и толщине защитного слоя бетона. После вычисления требуемой площади арматуры и подбора стержней, уточняется расстояние до центров стержней, и расчет повторяется. В случае свай квадратного сечения, первоначально подбор проводится для схемы армирования с четырьмя стержнями, расположенными вблизи углов сечения. Если четырех стержней максимального диаметра недостаточно, то проводится подбор для схемы армирования с дополнительными стержнями, расположенными вблизи середин сторон сечения. В случае круглых свай, число стержней при подборе арматуры принимается не менее 6.

Предусмотрено определение длины анкеровки стержней в случае, если в голове сваи требуется продольная арматура. При этом требуемая площадь арматуры рассчитывается не только при подборе арматуры, но и при задании арматуры. Однако, в последнем случае, длина анкеровки выводится, если требуемая площадь арматуры не превышает площади заданной арматуры. Длина анкеровки, в общем случае, выводится для растянутых и для сжатых стержней.

Расчет по образованию и раскрытию трещин, нормальных к продольной оси свай, проводится согласно [6], 7.2.11-7.2.12 или [7], 4.5, 4.14. В случае свай квадратного сечения с полостью или свай круглого сечения, расчет по [7] не проводится, так как для этих сечений отсутствуют нормативные указания по расчету. Расчет по трещиностойкости также не проводится, если не выполняются условия прочности материала свай.

## 5. Расчет ростверка

Ростверк рассматривается как многопролетная балка с опорами конечной ширины. В случае фундамента с одним рядом свай или с несколькими рядами и рядовом порядке размещения, расстояние между центрами опор принимается равным шагу свай в ряду. При шахматном порядке размещения, это расстояние принимается равным половине шага свай.

Расчеты по прочности и по трещиностойкости ростверка проводятся согласно [6] или [7]. Предусмотрен подбор верхней и нижней продольной арматуры в ростверке по требуемым площадям арматуры  $A_{св}$  и  $A_{сн}$ , определяемым расчетом по прочности для всех комбинаций нагрузок. Расстояния  $a_v$  и  $a_n$  от контура поперечного сечения ростверка до центров стержней верхней и нижней арматуры первоначально определяются по заданным максимальным диаметрам стержней и толщинам защитного слоя бетона. После вычисления требуемых площадей арматуры и подбора стержней, уточняются расстояния до центров стержней верхней и нижней арматуры, и расчет повторяется. Проверка прочности ростверка проводится по условиям:

$$M_{po} / M_{pu-} \leq 1$$

$$M_{pn} / M_{pu+} \leq 1$$

Здесь  $M_{po}, M_{pn}$  - изгибающие моменты на краю опоры и в середине пролета,  $M_{pu+}, M_{pu-}$  - предельные моменты при растянутой нижней и верхней арматуре.

## 6. Расчет осадки и крена фундамента

Расчет осадки проводится для фундамента с висячими сваями. В соответствии с [1], 7.4.6, [2], 7.4.2, [3], 6.1, осадка определяется как для условного фундамента на естественном основании согласно [8] или [9]. Осадка вычисляется методом послойного суммирования. При этом проверяется условие, что среднее давление под подошвой фундамента  $p$  не превышает расчетного сопротивления грунта основания  $R$ .

При наличии просадочного грунта, учитываются указания [1], 9.14, [2], 9.14, [3], 8.15. В грунтовых условиях II типа по просадочности, к собственному весу условного фундамента прибавляется негативная сила трения, возникающая при просадке грунта.

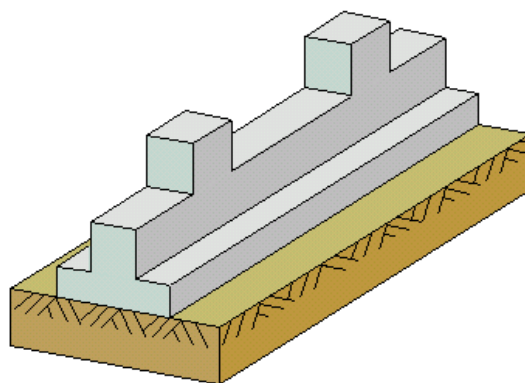
Крен условного фундамента определяется по формуле (5.24) [8] или (10) [9], прил.2.



## Литература

1. СП 24.13330.2011: Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85. – Минрегион России, 2010.
2. СП 50-102-2003. Проектирование и устройство свайных фундаментов / Госстрой России. – М.: ФГУП ЦПП, 2004. – 82 с.
3. СНиП 2.02.03-85. Свайные фундаменты / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 48 с.
4. СП 20.13330.2011: Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\*. – Минрегион России, 2010.
5. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1987. – 36 с.
6. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры / ГУП «НИИЖБ», ФГУП ЦПП. – М., 2004.
7. СНиП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 80 с.
8. СП 22.13330.2011: Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\*. – Минрегион России, 2010.
9. СНиП 2.02.01-83\*. Основания зданий и сооружений / Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2002. – 48 с.
10. ГОСТ 23161-78 Грунты. Метод лабораторного определения характеристик просадочности.

## 520 - Ленточный фундамент



Программа предназначена для проектирования ленточного фундамента под колонны согласно следующим нормам: СНиП 2.03.01-84\* [1], СП 52-101-2003 [2], СНБ 5.03.01-02 [3]. Осадка фундамента определяется согласно СНиП 2.02.01-83\* [4]. Реактивное давление грунта рассчитывается с учетом совместного деформирования фундамента и основания. Учитывается возможность отрыва частей фундамента от основания. Определяется требуемая площадь арматуры и производится конструирование арматуры в сечении. По результатам конструирования осуществляется графический вывод сечений с подобранными арматурными стержнями. Проводится расчет фундамента по трещиностойкости. Предусмотрен нелинейный расчет осадки фундамента с учетом неупругих свойств железобетона и наличия трещин.

## 1. Расчетная схема

Расчетная схема фундамента представляет собой последовательность балочных элементов (частей) прямоугольного или таврового сечения с полкой по низу (рис.1). Возможен ввод полки переменной толщины. На различных частях фундамента могут задаваться различные сечения. Разбиение фундамента на части необходимо, если сечение фундамента ступенчато изменяется по длине фундамента. При постоянном сечении, разбиение фундамента на части позволяет провести независимый подбор арматуры на отдельных частях фундамента. Части нумеруются в направлении от левого края фундамента к правому краю. Возможно задание до 20 частей. При расчете применяется координатная ось  $x$  с началом в крайнем левом сечении фундамента. Положение колонны определяется координатой центра сечения колонны  $x_k$ . Разбиение фундамента на части должно производиться так, чтобы колонны располагались в пределах одной части.

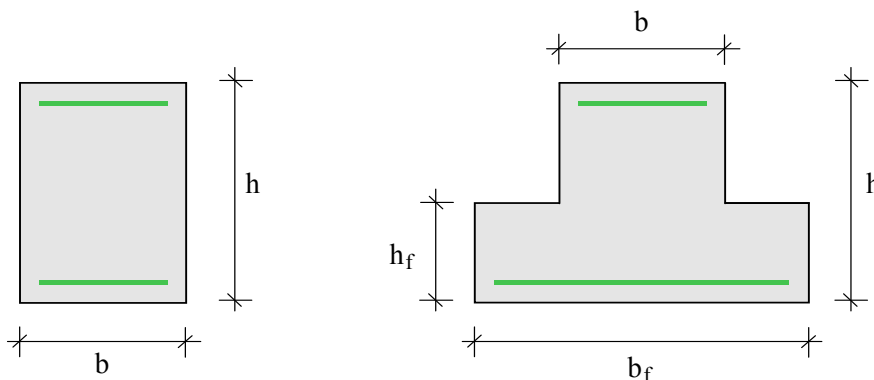


Рис. 1. Сечения

Основание может состоять из нескольких горизонтальных слоев, каждый из которых характеризуется толщиной  $h_i$  и модулем деформации  $E_i$ . Слои нумеруются в направлении от подошвы фундамента вглубь основания. Возможно задание до 20 слоев. Нижняя граница последнего из заданных слоев должна совпадать или с границей сжимаемой толщи основания, или с границей скальной породы. При вводе, суммарная толщина слоев не должна превышать 200 м.

Задача о совместном деформировании фундамента и основания относится к классу пространственных контактных задач. При ее решении предполагается, что перемещение точек подошвы фундамента и реактивное давление грунта постоянны по ширине фундамента  $b$  (или  $b_f$ ). Учитывается, что на участках отрыва фундамента от основания реактивное давление равно нулю. Увеличение жесткости участков фундамента непосредственно под колоннами в программе не учитывается. Влияние повышенной жесткости подколонных участков может

быть оценено при помощи расчета, в котором фундамент разбивается на части, и сечения подколонных частей фундамента принимаются с увеличенной высотой.

## 2. Нагрузки

Нагрузка, передаваемая от каждой колонны на фундамент, задается в виде сосредоточенной вертикальной силы и сосредоточенного момента (рис.2). Предполагается, что сосредоточенная сила приложена в центре сечения колонны. При расчете, заданные сила и момент заменяются статически эквивалентными распределенными нагрузками, действующими на участке  $[x_k - h_k / 2, x_k + h_k / 2]$ , где  $h_k$  - высота сечения колонны. Возможен учет равномерно распределенных вертикальных нагрузок, действующих по всей длине фундамента или по его части.

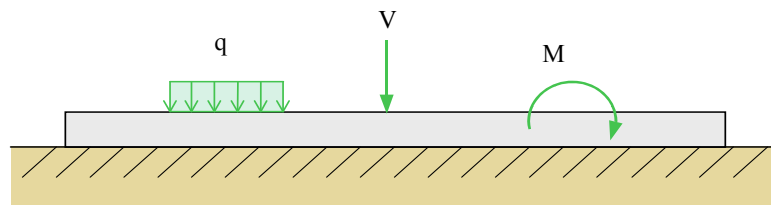


Рис. 2. Положительные направления нагрузок

При расчете по [1] и [2], классификация и комбинирование нагрузок принимаются согласно СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия» [5]. Нагрузки подразделяются на постоянные, длительные, кратковременные и особые. Комбинирование нагрузок представляет собой генерацию множества возможных комбинаций нагрузок с учетом коэффициентов надежности по нагрузке  $\gamma_f$  и коэффициентов, связанных с одновременным учетом двух и более временных нагрузок. При наличии особых нагрузок, наряду с основными комбинациями, генерируются также особые комбинации.

При расчете по [3] классификация и комбинирование нагрузок принимаются согласно Приложению А. Нагрузки подразделяются на постоянные, переменные и особые, а комбинации нагрузок - на основные (А.4) и особые (А.5). Частные коэффициенты безопасности  $\gamma_F$  для нагрузок принимаются по таблице А.2. Комбинационные коэффициенты  $\psi_0, \psi_1, \psi_2$  для переменных нагрузок принимаются по таблице А.1. Предусмотрен ввод нестандартных значений  $\gamma_F, \psi_0, \psi_1, \psi_2$  для отдельных нагрузок. Комбинирование нагрузок представляет собой генерацию множества основных и особых комбинаций нагрузок с учетом благоприятного и неблагоприятного эффекта от нагрузок, а также возможности доминирования каждой из переменных нагрузок.

Возможен ввод несочетаемых нагрузок. Такие нагрузки включаются в группу несочетаемых нагрузок. В комбинацию может войти только одна нагрузка из каждой группы. Нумерация групп начинается с единицы. Группы могут применяться, в частности, при учете ветровых нагрузок (при рассмотрении действия ветра по различным направлениям) и крановых нагрузок (при рассмотрении различных положений крана).

Возможен ввод знакопеременных нагрузок. В этом случае, в расчете учитывается как заданная нагрузка, так и нагрузка противоположного знака.

Для сокращения вычислений предусмотрен выбор среди всех возможных комбинаций нагрузок таких комбинаций, для которых усилия, осадка и давление принимают наибольшие значения при решении упрощенной задачи, в которой рассматривается винклеровское основание с постоянным коэффициентом постели, и не учитывается отрыв фундамента от основания.

Следует отметить, что численные результаты упрощенной задачи отличаются от результатов, полученных с учетом переменности коэффициента постели и отрыва фундамента от основания. При задании равномерно распределенных нагрузок, выбор комбинаций не производится, так как возможен пропуск существенных комбинаций.

Возможен ввод готовых расчетных комбинаций нагрузок. Задаваемая как вид нагрузки расчетная комбинация добавляется к множеству сгенерированных основных комбинаций нагрузок. В частности, возможен ввод лишь готовых комбинаций нагрузок. Готовые комбинации ставятся только в расчет по прочности.

### 3. Расчет усилий, осадки и давления

При расчете усилий в фундаменте, осадки фундамента и реактивного давления грунта, решается задача о совместном деформировании фундамента и основания. Решение строится при помощи метода итераций. На текущем итерационном шаге по найденному давлению вычисляется осадка основания. При этом применяется интегральное представление сжимающих напряжений  $\sigma_z(x,y,z)$  в грунте через давление по области контакта на границе полупространства и метод послойного суммирования, изложенный в [4], Приложение 2, согласно которому осадка

вычисляется по формуле  $w(x) = \beta \sum_i \int_{h_i} \frac{\sigma_z(x,0,z)}{E_i} dz$ , где  $\beta = 0,8$ .

Затем по давлению и найденной осадке рассчитывается распределение коэффициента постели по длине фундамента. Далее решается задача об изгибе фундамента на упругом основании с переменным коэффициентом постели, и отыскиваются внутренние усилия в фундаменте и прогиб, а затем рассчитывается соответствующее распределение реактивного давления грунта. Если возникает отрыв отдельных участков фундамента от основания, то на этих участках реактивное давление полагается равным нулю (при наличии отрыва фундамента задача носит нелинейный характер). Далее выполняется следующий итерационный шаг. Итерационный процесс оканчивается тогда, когда относительные приращения изгибающего момента и прогиба фундамента становятся менее 1%.

При решении задачи об изгибе фундамента предполагается, что бетон и арматурная сталь деформируются по линейному закону. Расчет фундамента производится дважды. Площадь требуемой арматуры, вычисленная при первом расчете фундамента, учитывается при определении изгибной жесткости фундамента во втором расчете. В выходном документе программы изгибная жесткость бетонного сечения (без учета арматуры) имеет обозначение  $D_b$ , а жесткость приведенного сечения -  $D_{bs}$ . Отметим, что при несимметричном армировании центр тяжести приведенного сечения не совпадает с центром тяжести бетонного сечения. В рассматриваемой задаче увеличение изгибной жесткости фундамента при учете арматуры приводит к увеличению изгибающего момента. Результаты расчета выводятся в табличной и графической формах. Следует учитывать, что при положительном изгибающем моменте растянута верхняя часть сечения, а при отрицательном – нижняя. При построении эпюры значения изгибающего момента откладываются со стороны растянутой зоны и, следовательно, верхняя часть эпюры соответствует положительному моменту, а нижняя часть – отрицательному моменту.

### 4. Расчет и конструирование продольной арматуры

Площади продольной арматуры рассчитываются из условия прочности нормальных сечений. При этом подколонные участки фундамента не рассматриваются, так как напряженное состояние на этих участках существенно отличается от изгибного напряженного состояния, и прочность обеспечивается при более низком армировании, чем на соседних участках.

При расчете фундамента согласно [1], требуемая арматура определяется в соответствии с п.3.28\*. Расчетное сопротивление бетона при сжатии принимается с коэффициентом условий работы бетона  $\gamma_b$ , который определяется как произведение отдельных коэффициентов  $\gamma_{bi}$  согласно таблице 15. При этом коэффициент  $\gamma_{b2}$ , зависящий от длительности действия нагрузки, определяется для каждой комбинации нагрузок по отдельности. Результирующий коэффициент условий работы с учетом коэффициента  $\gamma_{b2}$  не может быть менее 0,45.

При расчете фундамента согласно [2] и [3] требуемая арматура определяется на основе нелинейной деформационной модели ([2], п.6.2.21, [3], п.7.1.1.2). При расчете по [2] предусмотрен выбор расчетной диаграммы состояния сжатого бетона. Расчет требуемой арматуры по [3] проводится при параболически-линейной диаграмме состояния сжатого бетона, применяемой в случае, если усилия определяются путем линейно-упругого расчета (без учета неупругих свойств железобетона и наличия трещин).

Необходимые для расчета расстояния от центров тяжести площадей арматуры до граней сечения первоначально определяются по заданному наибольшему диаметру стержней с учетом заданной толщины защитного слоя бетона. По результатам расчета производится конструирование арматуры, и корректируются расстояния от центров тяжести площадей арматуры до граней сечения. Затем проводится повторный расчет и конструирование арматуры. Расстояния от центров тяжести площадей арматуры до граней сечения, для которых при повторном расчете определена требуемая продольная арматура, указываются в выходном документе программы.

При наличии полки производится подбор арматуры поперечного направления. При обычном расположении арматуры, толщина защитного слоя для нижней продольной арматуры определяется из условия плотного ее расположения над арматурой поперечного направления. При ином расположении арматуры задаются по отдельности толщины защитного слоя для нижней продольной арматуры и для арматуры поперечного направления.

При подборе арматурных стержней применяется следующий общий ряд диаметров (в мм): 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 32, 36, 40. Арматурные стержни размещаются в сечении с учетом толщины защитного слоя бетона и номинального расстояния в свету между стержнями.

При подборе арматурных стержней учитываются заданные минимальный и максимальный диаметры стержней, максимальное количество стержней в одном ряду, минимальное расстояние в свету между стержнями. При подборе стержней в тавровом сечении учитывается заданная доля (от 0% до 100%) продольной арматуры в свесах полки. Эти параметры позволяют управлять подбором арматуры. По результатам конструирования осуществляется графический вывод сечений с подобранными арматурными стержнями.

## 5. Расчет и конструирование арматуры в свесах полки

Рассматривается нагружение свеса полки равномерно распределенным давлением грунта. В качестве расчетного сечения принимается сечение шириной 1 м в плоскости грани ребра. Расчетный изгибающий момент [кНм/м] и расчетная поперечная сила [кН/м] определяются по формулам:

$$M = \frac{pc^2}{2}$$

$$Q = pc$$

где  $c$  - свес полки,  $p$  - наибольшее по длине фундамента давление грунта. При подборе арматуры учитываются минимальный и максимальный диаметры стержней, минимальное и максимальное значение шага стержней, а также минимальное значение коэффициента

армирования, который определяется как отношение площади арматуры к эффективной площади сечения, равной произведению ширины сечения ( $1m$ ) на рабочую высоту сечения.

Расчет на действие поперечной силы проводится по условию обеспечения несущей способности расчетного сечения без хомутов.

## 6. Расчет и конструирование поперечной арматуры

Погонная площадь поперечной арматуры  $A_{sw}/s_w$  рассчитывается из условия прочности наклонных сечений на действие поперечной силы по наклонной трещине. Расчет производится согласно [1], пп.3.31\*, 3.32, [2], п.6.2.34, [3], пп.7.2.1.1, 7.2.1.2, 7.2.1.5, 7.2.2.7 - 7.2.2.10. Кроме того, проводится проверка прочности на действие поперечной силы по наклонной полосе между наклонными трещинами. Если условие прочности по наклонной полосе не удовлетворяется, то выводится соответствующее сообщение. При расчете по [1] и [3], площадь арматуры, найденная из условия прочности по наклонной трещине, может быть увеличена для того, чтобы выполнялось условие прочности по наклонной полосе.

Расчет по прочности наклонных сечений проводится как для балки, опирающейся на колонны. Если по расчету требуется поперечная арматура, то производится табличный вывод значений требуемой погонной площади арматуры и верхнего предела для шага хомутов, а также выводится график распределения требуемой погонной площади арматуры по всей длине фундамента. Верхний предел для шага хомутов рассчитывается из условия, согласно которому, поперечная сила между хомутами должна полностью восприниматься бетоном сжатой зоны.

При подборе хомутов применяются следующие данные: диаметр хомута, число ветвей хомута (количество поперечных стержней в нормальном сечении), максимальный шаг хомутов, приращение шага хомутов, а также расстояние от грани колонны до оси первого хомута. Подбор хомутов заключается в определении шага хомутов и длин участков фундамента вблизи колонн, на которых хомуты устанавливаются с постоянным шагом. Шаг хомутов на первом от колонны участке определяется по наибольшему значению требуемой погонной площади арматуры. Шаг хомутов ограничивается заданным максимальным значением и расчетным верхним пределом. На втором от колонны участке шаг хомутов может быть принят тем же или, если это возможно, увеличен на заданное приращение шага. Для определения числа хомутов требуется задать расстояние от грани колонны до оси первого хомута. Это расстояние может быть задано равным половине шага или полному шагу хомутов. Иное смещение должно задаваться вводом соответствующего положительного значения. По результатам подбора хомутов выводится график распределения погонной площади арматуры на участках, примыкающих к колоннам. При графическом выводе длина участков увеличивается на половину шага.

## 7. Расчет по трещиностойкости

Расчет по образованию и раскрытию трещин, нормальных к продольной оси фундамента, проводится после конструирования арматуры. Расчет выполняется согласно [1], пп.4.5, 4.14, [2], пп.7.2.11, 7.2.12, [3], пп.8.2.1.7 – 8.2.1.10. При определении изгибающих моментов при помощи расчета усилий учитывается подобранная арматура.

Расчет по [1] и [2] проводится для изгибающих моментов от комбинаций нормативных нагрузок ( $\gamma_f = 1$ ). При расчете с выбором комбинаций выбираются такие комбинации, для которых изгибающий момент  $M$  от постоянных, длительных и кратковременных нагрузок и изгибающий момент  $M_I$  от длительно действующих нагрузок достигают наибольших по модулю значений. Моменты  $M$  и  $M_I$  определяются при помощи отдельных расчетов усилий.

Расчет согласно [1], выполняется по 3-й категории требований к трещиностойкости (допускается ограниченное по ширине непродолжительное  $a_{crc1}$  и продолжительное  $a_{crc2}$  раскрытие трещин) на основе формул, приведенных в [1] и [6].

Расчет согласно [2], проводится с использованием нелинейной деформационной модели. Момент  $M_{crc}$  при образовании трещин, а также напряжения  $\sigma_s$  и  $\sigma_{s,crc}$ , входящие в формулы (7.13) и (7.22), вычисляются на основе диаграмм состояния бетона и арматурной стали при помощи численного метода. Площадь сечения растянутого бетона  $A_{bt}$  и площадь сечения растянутой арматуры  $A_s$ , через которые по формуле (7.21) вычисляется базовое расстояние  $l_s$  между трещинами, определяются по моменту  $M_{crc}$  непосредственно перед образованием трещин. Значение  $A_{bt}$  определяется при следующих ограничениях на высоту растянутой зоны:  $h_t \geq 2a$ ,  $h_t \leq h/2$ , где  $a$  – расстояние от центра тяжести площади растянутой арматуры до ближайшей грани сечения.

Расчет по трещиностойкости, согласно [3], проводится для изгибающих моментов от практически постоянных комбинаций нагрузок ( $\gamma_F = 1$ ) с использованием нелинейной деформационной модели. Момент  $M_{cr}$  при образовании трещин, деформация растянутой арматуры  $\varepsilon_s$ , напряжения в растянутой арматуре после образования трещин  $\sigma_s$  и  $\sigma_{sr}$  вычисляются на основе параболически-линейной диаграммы состояния сжатого бетона и диаграммы арматурной стали при помощи численного метода. Момент  $M_{cr}$  определяется из условия достижения на растянутой грани сечения напряжения  $f_{ctm}$ . При этом состояние растянутого бетона описывается линейной диаграммой, соответствующей модулю упругости  $E_{cm}$ . Эффективная площадь растянутой зоны  $A_{c,eff}$  определяется при высоте  $h_{c,eff} = 2.5a$ , которая ограничивается условиями  $h_{c,eff} \leq h_t/2$  и  $h_{c,eff} \leq h/2$ , где  $h_t$  – высота растянутой зоны непосредственно перед образованием трещин.

## 8. Нелинейный расчет осадки

При нелинейном расчете осадки, учитываются нелинейные свойства железобетона и наличие трещин. При изгибе фундамента, распределение продольной деформации по высоте сечения определяется кривизной, величина которой зависит от изгибающего момента. При расчете согласно [1], кривизна вычисляется по формулам (155), (160) и (170). При этом учитывается длительность действия нагрузки, влияющая на величину деформаций ползучести. При расчете согласно [2], 7.3.16, кривизна определяется на основе нелинейной деформационной модели. При этом применяются диаграммы деформирования сжатого и растянутого бетона при непродолжительном и продолжительном действии нагрузки. Значения изгибающего момента от длительно действующих нагрузок определяются при помощи отдельного нелинейного расчета для длительно действующих нагрузок. Нелинейный расчет усилий в фундаменте проводится при помощи метода итераций. Итерационный процесс оканчивается тогда, когда относительные приращения изгибающего момента и прогиба становятся менее 1%.

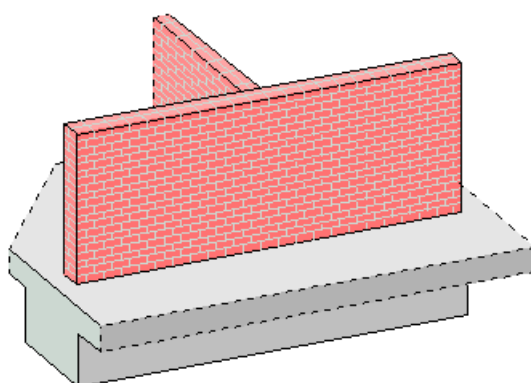
На участках с трещинами в растянутой зоне жесткость фундамента значительно ниже, чем на участках без трещин. Распределение осадки по длине фундамента, полученное при нелинейном расчете, может существенно отличаться от распределения осадки, найденного без учета неупругих свойств железобетона и наличия трещин.



### Литература

1. СНиП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 80 с.
2. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры / ГУП «НИИЖБ», ФГУП ЦПП. – М., 2004.
3. СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2003. – 139 с.
4. СНиП 2.02.01-83\*. Основания зданий и сооружений / Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2002. – 48 с.
5. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1987. – 36 с.
6. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелых и легких бетонов без предварительного напряжения арматуры (к СНиП 2.03.01-84) / ЦНИИпромзданий Госстроя СССР, НИИЖБ Госстроя СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 192 с.

## 521 - Ленточный фундамент под стену



Программа предназначена для проектирования железобетонного ленточного фундамента под стену согласно следующим нормам: СНиП 2.03.01-84\* [1], СП 52-101-2003 [2], СНБ 5.03.01-02 [3]. Предусмотрен подбор сечения фундамента, удовлетворяющего условиям прочности, жесткости, трещиностойкости, а также ограничениям осадки и крена согласно СНиП 2.02.01-83\* [5] или СП 50-101-2004 [6].

## 1. Фундамент

Возможны следующие виды сечений фундамента: прямоугольное, трапециевидное, ступенчатое. При расчете рассматривается нагружение консоли фундамента реактивным давлением грунта, действующим по подошве фундамента. Консоль выделяется продольным сечением фундамента в плоскости грани стены. Реактивное давление грунта основания определяется в предположении линейного распределения давления по подошве фундамента. Данное предположение оправдано, если отношение вылета консоли к высоте фундамента не превосходит значения 2. При действии только вертикальной нагрузки, реактивное давление постоянно по ширине подошвы, а при наличии моментной нагрузки, оно является переменным. При этом возможен отрыв края фундамента от основания. В зоне отрыва, реактивное давление грунта отсутствует. В этом случае, для безотрывной работы фундамента требуется увеличить ширину подошвы. При подборе сечения могут быть заданы минимальные размеры сечения. Приращение размеров сечения производится с заданным шагом.

## 2. Грунт

Грунт, расположенный под подошвой фундамента, может состоять из нескольких горизонтальных слоев с различными физико-механическими характеристиками. Слои нумеруются в направлении от подошвы фундамента вглубь основания. Возможно задание до 20 слоев. Предполагается, что последний заданный слой подстилается скальным грунтом. При отсутствии скального грунта, суммарная толщина слоев должна превышать сжимаемую толщину.

При наличии подземных вод, задается номер слоя грунта, кровля которого находится на уровне подземных вод. При наличии водоупора, задается номер слоя глинистого грунта, в котором практически отсутствует фильтрация подземных вод.

Для каждого слоя грунта задается удельный вес  $\gamma_s$  твердых частиц, удельный вес  $\gamma$  грунта природной влажности, коэффициент пористости  $e$ , удельное сцепление  $c$ , угол внутреннего трения  $\varphi$ , модуль деформации  $E$ . Для глинистого грунта дополнительно задается показатель текучести  $I_L$ . Значения  $c$ ,  $\varphi$ ,  $E$  для грунта, залегающего ниже уровня подземных вод, но выше водоупора, должны задаваться для водонасыщенного состояния.

Удельный вес грунта в водоносном слое, с учетом взвешивающего действия воды, определяется

автоматически по формуле  $\gamma_{sb} = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1 + e}$  ( $\gamma_w$  - удельный вес воды,  $\gamma_w = 10$  кН/м<sup>3</sup>).

## 3. Нагрузки

Нагрузки, передаваемые от стены на фундамент, задаются в виде распределенных вертикальных сил  $N$  [кН/м] и распределенных моментов  $M$  [кНм/м].

При расчете по [1] и [2], классификация и комбинирование нагрузок принимаются согласно СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия» [4]. Нагрузки подразделяются на постоянные, длительные, кратковременные и особые. Комбинирование нагрузок представляет собой генерацию множества возможных комбинаций нагрузок с учетом коэффициентов надежности

по нагрузке  $\gamma_f$  и коэффициентов, связанных с одновременным учетом двух и более временных нагрузок. При наличии особых нагрузок, наряду с основными комбинациями, генерируются также особые комбинации.

При расчете по [3], классификация и комбинирование нагрузок принимаются согласно Приложению А. Нагрузки подразделяются на постоянные, переменные и особые, а комбинации нагрузок - на основные (А.4) и особые (А.5). Частные коэффициенты безопасности  $\gamma_F$  для нагрузок принимаются по таблице А.2. Комбинационные коэффициенты  $\psi_0, \psi_1, \psi_2$  для переменных нагрузок принимаются по таблице А.1. Предусмотрен ввод нестандартных значений  $\gamma_F, \psi_0, \psi_1, \psi_2$  для отдельных нагрузок. Комбинирование нагрузок представляет собой генерацию множества основных и особых комбинаций нагрузок с учетом благоприятного и неблагоприятного эффекта от нагрузок, а также возможности доминирования каждой из переменных нагрузок.

Предусмотрен учет собственного веса фундамента как постоянной нагрузки. При подборе сечения, величина этой нагрузки варьируется вместе с размерами сечения.

#### 4. Расчет по прочности

Расчет на действие изгибающего момента проводится в расчетном продольном сечении под гранью стены, имеющем ширину 1 м. По изгибающим моментам от комбинаций расчетных нагрузок определяется требуемая площадь арматуры поперечного направления. Согласно [1], требуемая арматура определяется в соответствии с п.3.28\*. Расчетное сопротивление бетона при сжатии принимается с коэффициентом условий работы бетона  $\gamma_b$ , который определяется как произведение отдельных коэффициентов  $\gamma_{bi}$  согласно таблице 15. При этом коэффициент  $\gamma_{b2}$ , зависящий от длительности действия нагрузки, определяется для каждой комбинации нагрузок по отдельности. При расчете согласно [2] и [3], требуемая арматура определяется на основе нелинейной деформационной модели ([2], п.6.2.21, [3], п.7.1.1.2). При расчете по [2] применяется трехлинейная диаграмма состояния сжатого бетона, а при расчете по [3] - параболически-линейная диаграмма. При подборе арматуры учитываются минимальный и максимальный диаметры стержней, минимальное и максимальное значение шага стержней, а также минимальное значение коэффициента армирования, который определяется как отношение площади арматуры к эффективной площади сечения, равной произведению ширины сечения (1 м) на рабочую высоту сечения.

Расчет на действие поперечной силы проводится по условию обеспечения несущей способности расчетного сечения без хомутов.

При рассмотрении фундамента ступенчатого сечения производятся дополнительные расчеты по прочности консоли нижней ступени. При этом в качестве расчетного сечения рассматривается продольное сечение фундамента под боковой гранью верхней ступени.

#### 5. Расчет по трещиностойкости

Расчет по образованию и ширине раскрытия трещин выполняется согласно [1], пп.4.5, 4.14, [2], пп.7.2.11, 7.2.12, [3], пп.8.2.1.7 – 8.2.1.10. Расчет по [1] и [2] проводится для изгибающих моментов от комбинаций нормативных нагрузок ( $\gamma_f = 1$ ). Расчет согласно [2], проводится с использованием нелинейной деформационной модели. Расчет по трещиностойкости, согласно [3], проводится для изгибающих моментов от практически постоянных комбинаций нагрузок ( $\gamma_F = 1$ ) с использованием нелинейной деформационной модели. Предусмотрено увеличение площади арматуры, если ширина раскрытия трещин превышает предельно допустимое значение.

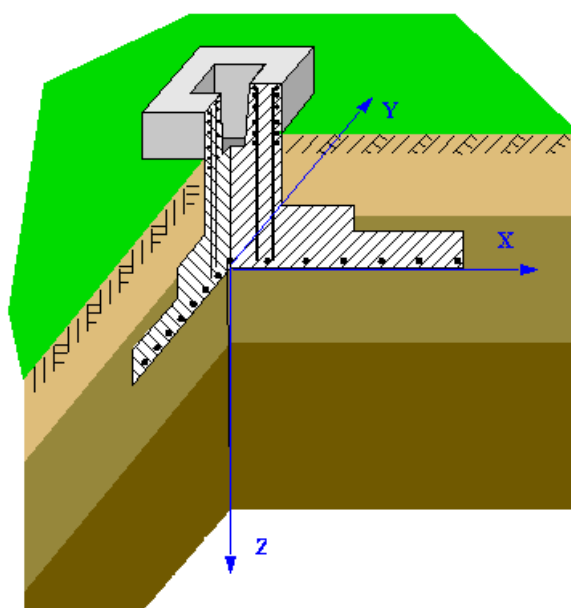
## 6. Расчет осадки и крена

Расчет осадки основания проводится согласно [5], прил.2, п.1 или [6], 5.5.31 методом послойного суммирования. Крен фундамента определяется по формуле (10) [5], прил.2 или по формуле (5.22) [6]. При этом средние в пределах сжимаемой толщи значения модуля деформации и коэффициента Пуассона определяются по формулам (11) и (12) [5], прил.2 или по формулам (5.23) и (5.24) [6].

## Литература

1. СНиП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 80 с.
2. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры / ГУП «НИИЖБ», ФГУП ЦПП. – М., 2004.
3. СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2003. – 139 с.
4. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1987. – 36 с.
5. СНиП 2.02.01-83\*. Основания зданий и сооружений / Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2002. – 48 с.
6. СП 50-101-2004. Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений. – М.: ФГУП ЦПП, 2005.

## 535 - Отдельный фундамент под железобетонную колонну



Программа предназначена для проектирования отдельного фундамента под железобетонную колонну согласно СП 52-101-03 [1] или СНиП 2.03.01-84\* [2] или СНБ 5.03.01-02 “Бетонные и железобетонные конструкции” [6] и СНиП 2.02.01-83\* “Основания зданий и сооружений” [3] или СП 50-101-2004 “Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений” [8] или СП 22.13330.2011 “Основания зданий и сооружений” [9]. Предусмотрено два типа сопряжения колонны с фундаментом: монолитное и заделка колонны в стакан.

## 1. Расчетная схема

Расчет фундамента состоит из двух частей. Сначала определяются размеры подошвы, исходя из расчетов основания по деформациям и несущей способности, а затем рассчитываются геометрические параметры и арматура фундамента.

### 1.1 Характеристики основания

Характеристики основания задаются по слоям. Каждый слой задается координатой его верхней границы, отсчитываемой от подошвы фундамента. Отрицательная координата задает слой, лежащий выше подошвы, последний введенный слой считается распространяющимся до бесконечности.

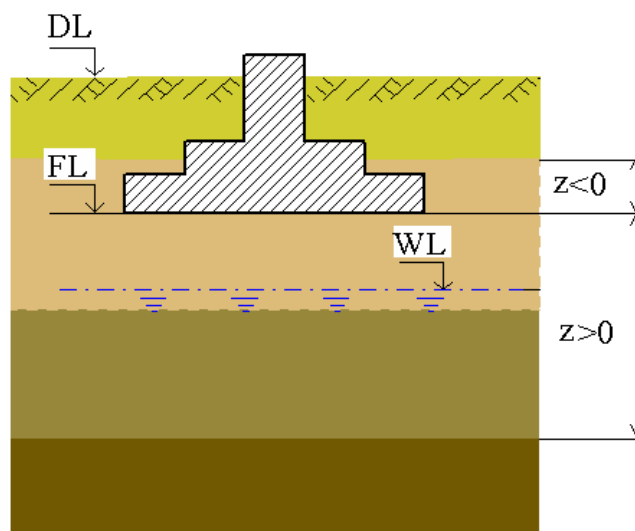


Рис. 1. Схема задания характеристик основания

Для каждого слоя должны быть заданы: удельный вес, модуль деформации, угол внутреннего трения и удельное сцепление. Расчетное сопротивление грунта для каждого слоя может быть либо задано непосредственно, либо вычислено в программе по пп. 2.41, 2.47 СНиП 2.02.01-83\* или пп.5.5.8, 5.5.24 СП 50-101-2004 или пп.5.5.8, 5.5.24 СП 22.13330.2011. В последнем случае, необходимо дополнительно задать тип грунта в каждом слое. Допускаются следующие типы грунтов: пылевато-глинистые, песчаные, крупнообломочные и скальные.

### 1.2 Характеристики фундамента

Исходными данными для расчета фундамента являются его геометрические характеристики и классы бетона и стали продольной и поперечной арматуры. Заданные геометрические характеристики: размеры подошвы, толщина плиты, размеры ступенек и подколонника рассматриваются как минимальные, если заданы соответствующие приращения, или как неизменяемые при нулевых приращениях.



## 2. Нагрузки

Вертикальная сила  $N$ , горизонтальные силы  $Q_x$ ,  $Q_y$  и моменты  $M_x$ ,  $M_y$  передаются на фундамент в центре сечения колонны на уровне верхнего обреза фундамента. Положительные направления сил и векторов моментов соответствуют направлениям осей координат.

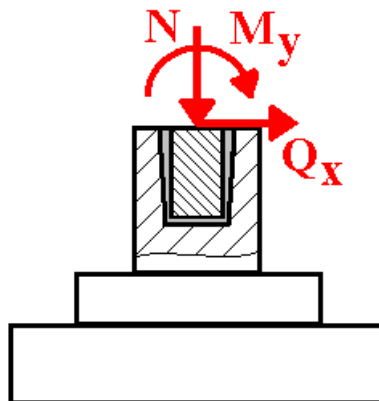


Рис. 2. Схема приложения нагрузок

Разделение нагрузок по категориям и вычисление РСУ производится либо по СНиП 2.01.07-85 “Нагрузки и воздействия” [4] или СП 20.13330.2011 “Нагрузки и воздействия” [10], либо по Приложению А СНБ 5.03.01-02 [6] или по Приложению А.1 СТБ ЕН 1990-2007 “Основы проектирования несущих конструкций”. Сочетания нагрузок для всех расчётов строятся автоматически. Возможно задание как нагрузок, так и готовых расчётных сочетаний нагрузок.

Для сейсмического воздействия и динамической составляющей ветровой нагрузки должны задаваться нагрузки, которые соответствуют формам колебаний. Принимается, что эти нагрузки являются знакопеременными. При наличии таких воздействий, в расчётном сочетании усилий, моменты и силы вычисляются согласно [5] по формуле:

$$N = \sqrt{\sum_{i=1}^n N_i^2}$$

где  $N_i$  - усилия, вызываемые нагрузками, которые соответствуют  $i$ -й форме колебаний конструкции,  $n$  – число учитываемых форм колебаний. Вычисленное значение  $N$  принимается с тем знаком (+ или -), который имеет наибольшее по модулю значение  $N_i$ .

## 3. Расчет основания, выбор размеров подошвы фундамента

Расчет основания по несущей способности проводится для всех возможных основных и особых сочетаний нагрузок. Сначала производится расчет основания по несущей способности по пп. 2.58 – 2.62 СНиП 2.02.01-83\* или пп.5.6.2 - 5.6.11 СП 50-101-2004 или пп.5.7.2 - 5.7.11 СП 22.13330.2011 с размерами подошвы, заданными пользователем. При наличии под подошвой фундамента нескольких слоев нескальных грунтов, угол внутреннего трения и удельное сцепление осредняются по обертывающей поверхностям скольжения, а удельный вес – по объему внутри нее (рис. 3).

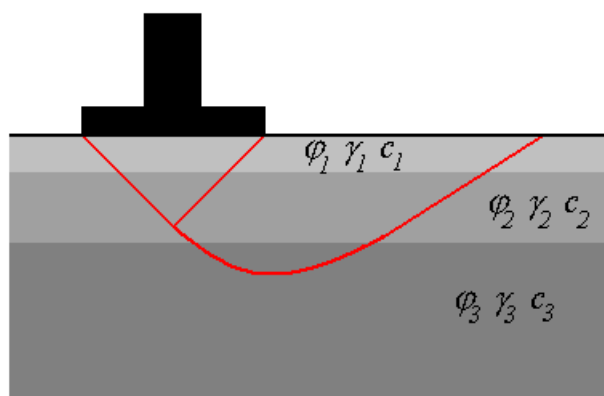


Рис. 3. Область осреднения характеристик грунта

Если заданы приращения размеров подошвы, и не выполнено условие (11) [3], то программа увеличивает площадь подошвы, пока несущая способность основания не станет достаточной.

Далее программа проводит расчет основания по деформациям для всех возможных основных сочетаний нагрузок. При этом, на первом этапе, проверяются требования пп. 2.41, 2.47 – 2.49 [3] (или аналогичные требования других норм) и, если для какого-нибудь сочетания нагрузок среднее давление под подошвой и/или краевое и/или угловое давление превышает расчетное сопротивление грунта, программа увеличивает размеры подошвы фундамента в направлении, соответствующем типу превышения. Затем производится расчет деформаций основания по формулам и таблицам приложения 2 [3] (или аналогичных требований других норм). При этом, выбор расчетной схемы для СНиП 2.02.01-83\* производится в соответствии с п. 2.40 [3], а для других норм применяется схема деформируемого полупространства. При превышении допустимой осадки и/или крена фундамента производится пошаговое увеличение размеров подошвы.

#### 4. Выбор размеров фундамента и расчет арматуры

Толщина плиты фундамента определяется из расчета на продавливание таким образом, чтобы требования п. 3.42 [2] или 3.2.6.2 [1] или 7.4.3 [6] удовлетворялись без установки поперечной арматуры, но не меньше заданного пользователем значения. Размеры подколонника, заданные пользователем, могут быть увеличены, если это требуется для обеспечения прочности сечений, наклонных к плоскости плиты, и заданы соответствующие приращения размеров. Затем, с целью уменьшения объема, плита делится на две или три ступеньки, размеры которых рассчитываются, исходя из требований прочности на продавливание и обеспечения прочности наклонных сечений без установки поперечной арматуры.

Требуемая арматура плиты определяется, исходя из расчетов ее по [1] или [2] или [6] как изгибаемого элемента по предельным состояниям первой и второй групп. Расчеты проводятся отдельно на изгиб в плоскостях  $XZ$  и  $YZ$  для всех возможных основных и особых сочетаний усилий. При этом реактивное давление грунта на подошву определяется с учетом возможного ее отрыва от основания и без учета веса плиты и грунта над ней. Расчет проводится для нескольких сечений: в центре плиты и по граням ступенек. Для рассчитанных значений требуемой по условиям прочности арматуры подбирается диаметр и шаг расположения арматурных стержней.

Расчет поперечной арматуры стакана проводится в предположении линейного распределения контактного давления по длине заделанной части колонны (рис. 4).

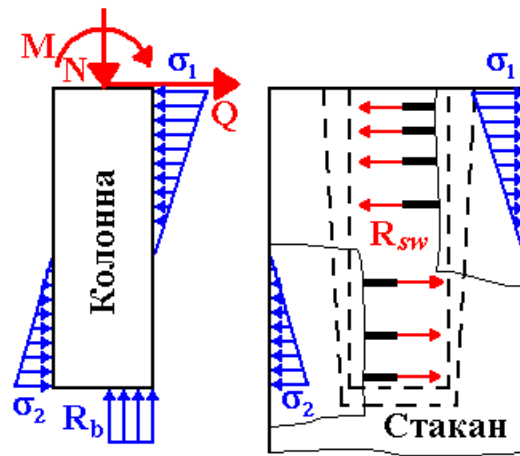


Рис. 4. Расчет поперечной арматуры стакана

Диаметр и расположение хомутов подбираются так, чтобы в предельном состоянии усилия в них  $R_{sw}$  уравнивали давление колонны на стенки стакана. Расчет проводится на все возможные основные и особые сочетания усилий.

Продольная арматура стакана рассчитывается для двух сечений: коробчатого сечения на уровне дна стакана и прямоугольного сечения в месте соединения подколонника с плитой. Расчеты проводятся для всех возможных основных и особых сочетаний усилий с симметричным армированием стакана в каждой плоскости изгиба. Для максимальных рассчитанных значений требуемой арматуры подбираются диаметр и шаги расположения арматурных стержней.

Косвенная арматура подколонника рассчитывается по п. 3.41 [2] или 3.2.5.3 [1] или 7.4.1 [6] для всех возможных основных и особых сочетаний усилий. Для максимального значения требуемой арматуры подбираются параметры арматурных сеток (диаметр и шаг), а также количество сеток и расстояние между ними.

При некоторых сочетаниях нагрузок, в плите могут возникать изгибающие моменты противоположного знака, т.е. растягивающие верхние волокна. В этом случае, производится проверка несущей способности бетонного сечения плиты по п. 3.8 [2] и, при недостаточной прочности бетонного сечения, производится расчет и подбор арматуры верхней части плиты.

## 5. Вывод результатов

### 5.1 Исходные данные

Выводятся заданные пользователем начальные размеры фундамента, нагрузки и характеристики грунтов основания.

<u>Данные для расчета</u>							
<b>Размеры</b>							
Объект	размеры по X и по Y		высота/глубина h/dс				
	[см]	[см]	[см]				
плита	100.0	100.0	30.0				
подколонник	90.0	90.0	170.0				
колонна	40.0	40.0	80.0				
Высота фундамента от подошвы 200.0 см							
<b>Нагрузки</b>							
N	Нагрузка.	N	Mx	My	Qx	Qy	
		[кН]	[кН*м]	[кН*м]	[кН]	[кН]	
1	Постоянная	2000.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
2	Длительная	2000.0	10.0	10.0	13.0	0.0	
3	Ветер стат.	200.0	5.0	0.0	0.0	0.0	
	дин. 1	200.0	5.0	0.0	0.0	0.0	
	2	15.0	0.0	7.0	0.0	0.0	
	3	12.0	0.0	3.0	0.0	0.0	
4	Сейсмич.	1	100.0	60.0	20.0	8.0	30.0
	2	20.0	30.0	7.0	3.0	15.0	
	3	30.0	10.0	5.0	2.0	7.0	
<b>Грунт</b>							
нормативные значения характеристик по слоям.							
тип	z	q	E	fi	c/Rc	IL	
	[м]	[кН/м <sup>2</sup> ]	[МПа]	[град]	[кПа]		
Крупн. обл.	-2.00	20.00	40.00	28.00	25.00	0.30	
Песчаный	3.00	17.00	20.00	20.00	20.00	0.50	
Песчаный	3.50	20.00	20.00	23.00	18.00	0.50	

## 5.2 Расчетные сочетания усилий

Расчеты в программе проводятся для всех возможных сочетаний усилий, но в разделе “PCY” выводятся силовые факторы и коэффициенты только для тех расчетных сочетаний усилий, которые оказались существенными для какого-либо из расчетов, проведенных программой.

<u>PCY</u>								
расчетные сочетания усилий по СНиП 2.01.07-85.								
для опасных PCY на высоте H от подошвы фундамента.								
N	Тип табл.	N	Mx	My	Qx	Qy		
	PCY коэф.	[кН]	[кН*м]	[кН*м]	[кН]	[кН]		
1	тр.кр. 1	4097.5	14.0	16.6	12.4	0.0		
2	тр.дл. 2	4000.0	10.0	10.0	13.0	0.0		
3	основ. 3	4200.0	10.0	10.0	13.0	0.0		
4	основ. 4	4376.5	15.8	19.4	12.4	0.0		
5	особая 5	3686.3	75.8	29.8	19.2	34.3		
<b>Наиболее опасные сочетания усилий</b>								
Наг-руж.	Коэффициенты расчетных сочетаний усилий							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1.00	1.00	1.10	1.10	0.99			
2	0.95	1.00	1.00	0.95	0.80			
3	0.90	0.90	0.00	1.26	0.00			
4	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00			

## 5.3 Результаты расчета фундамента

В этом разделе в табличной форме и в виде эскиза приводятся вычисленные на различных этапах расчета размеры плиты и подколонника.

<u>Результаты расчета</u>			
геометрических характеристик фундамента.			
Объект	размеры по X и по Y		высота h
	[см]	[см]	[см]
плита 1	270.0	270.0	30.0
плита 2	168.0	168.0	12.0
плита 3	124.0	124.0	12.0
плита 4	270.0	30.0	0.0
подколонник	90.0	90.0	146.0

Схема фундамента вид сбоку  
 М = 1 : 23

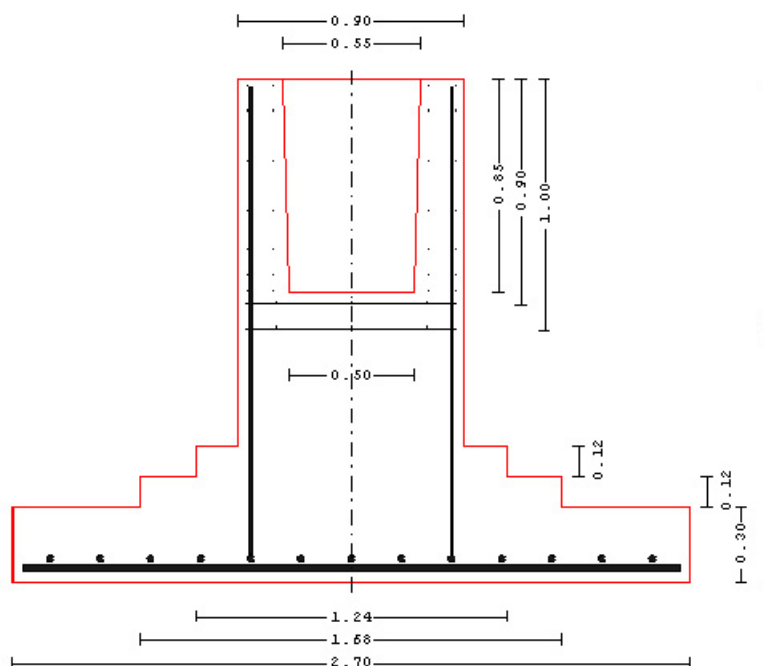
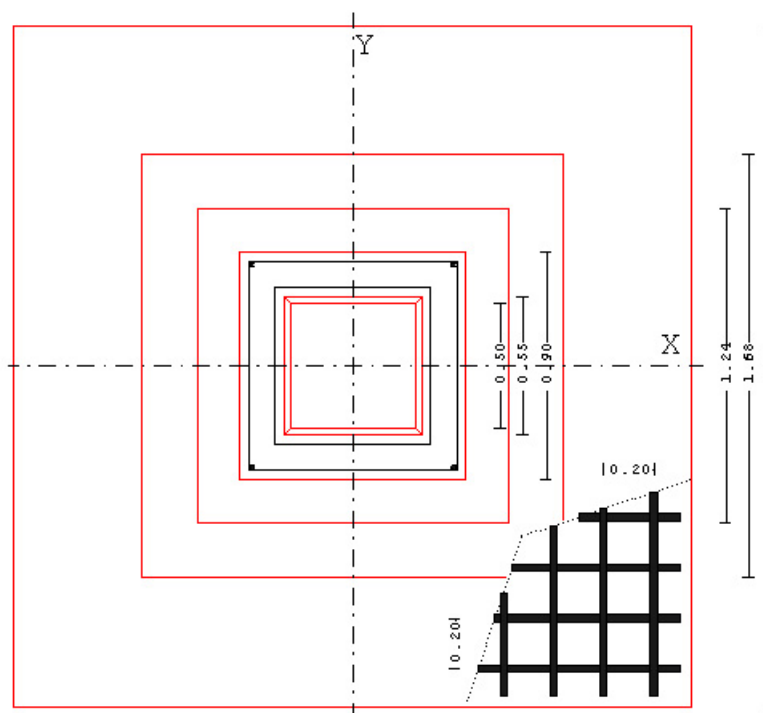


Схема фундамента вид сверху  
 М = 1 : 23



## 5.4 Расчет основания

Приводятся результаты расчета основания по деформациям и несущей способности.

<u>Расчет основания</u>	по СНиП 2.02.01-83*
Расчет по деформациям	<p>Схема линейно деформируемого полупространства.          Наибольшая осадка достигается при РСУ N 4.          Среднее давление под подошвой <math>p=640.3</math> кПа          Краевое давление вдоль оси y <math>p_y=646.3</math> кПа          Краевое давление вдоль оси x <math>p_x=645.2</math> кПа          Давление в угловой точке <math>p_{xy}=651.1</math> кПа          Расчетное сопротивление грунта по 2.41 <math>R=537.4</math> кПа          Сопротивление грунта с учетом 2.47 <math>R=644.9</math> кПа          Осадка фундамента <math>s=4.4</math> см <math>&lt; s_{\text{н}}=10.0</math> см          Наибольший крен достигается при РСУ N 4,          Крен фундамента <math>i=0.0001 &lt; i_{\text{н}}=0.0050</math></p>
Расчет по несущей способности	<p>Наиболее опасным по устойчивости является РСУ N 5.          Макс. глубина поверхности скольжения <math>z_m=2.94</math> м          Сила предельного сопротивления грунта <math>N_u=5646</math> кПа</p>

## 5.5 Расчет железобетонного фундамента

В этом разделе приводятся результаты расчета плиты фундамента на продавливание, расчетов продольной, поперечной и косвенной арматуры, а также проверки ширины раскрытия трещин.

<u>Продавливание.</u>	<p>Расчет на продавливание по СНиП 52-01-03.          Тяжелый Яетон. Класс прочности B15.</p>																																																															
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Плита</th> <th>PCY</th> <th>Lx [м]</th> <th>Ly [м]</th> <th>Ab [м<sup>2</sup>]</th> <th>Wbx [м<sup>3</sup>]</th> <th>Wby [м<sup>3</sup>]</th> <th>r</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>3.977</td> <td>3.022</td> <td>2.051</td> <td>3.432</td> <td>0.000</td> <td>0.90</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>1</td> <td>2.208</td> <td>2.243</td> <td>4.584</td> <td>3.496</td> <td>3.304</td> <td>0.95</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>1</td> <td>1.698</td> <td>1.673</td> <td>5.291</td> <td>3.008</td> <td>2.935</td> <td>0.94</td> </tr> </tbody> </table>	Плита	PCY	Lx [м]	Ly [м]	Ab [м <sup>2</sup> ]	Wbx [м <sup>3</sup> ]	Wby [м <sup>3</sup> ]	r	1	1	3.977	3.022	2.051	3.432	0.000	0.90	2	1	2.208	2.243	4.584	3.496	3.304	0.95	3	1	1.698	1.673	5.291	3.008	2.935	0.94																															
Плита	PCY	Lx [м]	Ly [м]	Ab [м <sup>2</sup> ]	Wbx [м <sup>3</sup> ]	Wby [м <sup>3</sup> ]	r																																																									
1	1	3.977	3.022	2.051	3.432	0.000	0.90																																																									
2	1	2.208	2.243	4.584	3.496	3.304	0.95																																																									
3	1	1.698	1.673	5.291	3.008	2.935	0.94																																																									
<u>Расчет арматуры</u>	<p>по СНиП 52-01-03, с использованием трехлинейной диаграммы состояния Яетона.          Класс арматурной стали: A500</p>																																																															
Арматура плиты Нижняя арматура	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Ось прутка</th> <th>Коорд. [м]</th> <th>PCY</th> <th>Mизг [кН*м]</th> <th>h [см]</th> <th>As [см<sup>2</sup>]</th> <th>d [мм]</th> <th>n</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>X</td> <td>1.86</td> <td>1</td> <td>71.0</td> <td>25.8</td> <td>11.1</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>0.84</td> <td>1</td> <td>1101.9</td> <td>52.8</td> <td>49.4</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>0.00</td> <td>1</td> <td>2856.2</td> <td>79.8</td> <td>85.4</td> <td>25</td> <td>22</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>1.39</td> <td>1</td> <td>338.7</td> <td>23.3</td> <td>35.8</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>0.87</td> <td>1</td> <td>963.0</td> <td>50.3</td> <td>45.1</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>0.00</td> <td>1</td> <td>2700.0</td> <td>77.3</td> <td>83.3</td> <td>25</td> <td>22</td> </tr> </tbody> </table>	Ось прутка	Коорд. [м]	PCY	Mизг [кН*м]	h [см]	As [см <sup>2</sup> ]	d [мм]	n	X	1.86	1	71.0	25.8	11.1			X	0.84	1	1101.9	52.8	49.4			X	0.00	1	2856.2	79.8	85.4	25	22	Y	1.39	1	338.7	23.3	35.8			Y	0.87	1	963.0	50.3	45.1			Y	0.00	1	2700.0	77.3	83.3	25	22							
Ось прутка	Коорд. [м]	PCY	Mизг [кН*м]	h [см]	As [см <sup>2</sup> ]	d [мм]	n																																																									
X	1.86	1	71.0	25.8	11.1																																																											
X	0.84	1	1101.9	52.8	49.4																																																											
X	0.00	1	2856.2	79.8	85.4	25	22																																																									
Y	1.39	1	338.7	23.3	35.8																																																											
Y	0.87	1	963.0	50.3	45.1																																																											
Y	0.00	1	2700.0	77.3	83.3	25	22																																																									
Верхняя арматура	<p>Нижние прутки ориентированы по оси X.          и проверка плиты на действие ояратного момента.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Плита</th> <th>PCY</th> <th>Ось</th> <th>Mизг [кН*м]</th> <th>Rbt*Wpl [кН*м]</th> <th>As [см<sup>2</sup>]</th> <th>n</th> <th>d [мм]</th> <th>s [мм]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Y</td> <td>4</td> <td>338.44</td> <td>85.05</td> <td>26.53</td> <td>22</td> <td>14</td> <td>200</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>X</td> <td>4</td> <td>419.02</td> <td>83.31</td> <td>33.41</td> <td>22</td> <td>14</td> <td>200</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Y</td> <td>4</td> <td>338.44</td> <td>433.42</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>X</td> <td>4</td> <td>419.02</td> <td>339.16</td> <td>16.72</td> <td>15</td> <td>12</td> <td>300</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Y</td> <td>4</td> <td>338.44</td> <td>398.25</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>X</td> <td>4</td> <td>419.02</td> <td>365.78</td> <td>11.22</td> <td>11</td> <td>12</td> <td>400</td> </tr> </tbody> </table>	Плита	PCY	Ось	Mизг [кН*м]	Rbt*Wpl [кН*м]	As [см <sup>2</sup> ]	n	d [мм]	s [мм]	1	Y	4	338.44	85.05	26.53	22	14	200	1	X	4	419.02	83.31	33.41	22	14	200	2	Y	4	338.44	433.42					2	X	4	419.02	339.16	16.72	15	12	300	3	Y	4	338.44	398.25					3	X	4	419.02	365.78	11.22	11	12	400
Плита	PCY	Ось	Mизг [кН*м]	Rbt*Wpl [кН*м]	As [см <sup>2</sup> ]	n	d [мм]	s [мм]																																																								
1	Y	4	338.44	85.05	26.53	22	14	200																																																								
1	X	4	419.02	83.31	33.41	22	14	200																																																								
2	Y	4	338.44	433.42																																																												
2	X	4	419.02	339.16	16.72	15	12	300																																																								
3	Y	4	338.44	398.25																																																												
3	X	4	419.02	365.78	11.22	11	12	400																																																								

Поперечная  
арматура стакана

Класс арматурной стали: А300

Ось	Z [см]	PCY	p [кН/м]	A <sub>с</sub> /s [см <sup>2</sup> /м]	s [мм]	d [мм]	n
X	4.2	3	3966.9	184.5	40	16	4
X	8.2	3	2784.1	129.5	50	16	4
X	13.2	3	2062.8	95.9	50	16	4
X	18.2	3	1341.5	62.4	100	16	4
X	28.2	3	101.0	4.7	100	16	4
X	38.2	3	1543.5	71.8	50	16	4
X	43.2	3	2264.8	105.3	50	16	4
X	48.2	3	2986.0	138.9	40	16	4
X	52.2	3	3563.0	165.7	40	16	4
X	56.2	3	3966.9	184.5	40	16	4

Косвенная арматура

Координата Z принимается от верхнего края стакана подколонника. Класс арматурной стали: А300  
Наиболее опасное PCY N 1. 2 сетки с шагом 100мм.  
Сетки из прутков диаметром 10мм, с шагом 100мм.

Продольная арматура

подколонника. Класс арматурной стали: А500  
Наиболее опасное PCY N1. Диаметр прутков 14мм.  
28 прутков с шагом по оси X 100мм, по оси Y 100мм.

Трещиностойкость

Предельно допустимая ширина раскрытия трещин принимается из условия обеспечения сохранности арматуры  
асrc1=0.40мм асrc2=0.30мм

Плита

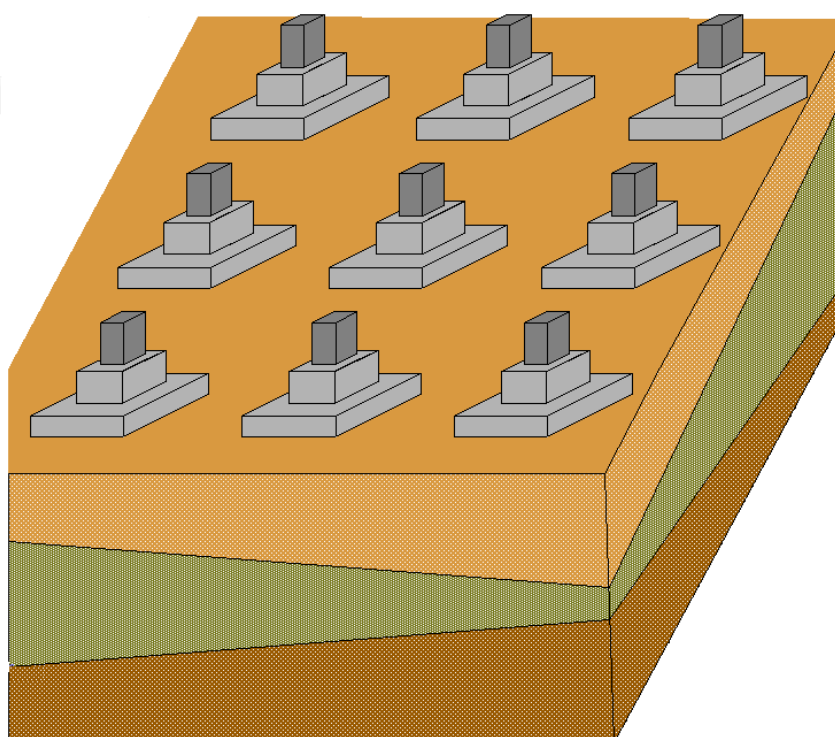
Ось	Коорд. [м]	PCY	Mизг2 [кН*м]	Mизг1 [см <sup>2</sup> ]	Mсрс [кН*м]	асrc2 [мм]	асrc1 [мм]
X	1.86	2 1	42.6	71.0	165.3	0.00	0.00
X	0.84	2 1	658.2	1101.9	547.4	0.06	0.14
X	0.00	2 1	1698.6	2856.2	1127.8	0.14	0.29
Y	1.39	2 1	196.4	338.7	151.4	0.05	0.11
Y	0.87	2 1	558.6	963.0	529.7	0.04	0.12
Y	0.00	2 1	1566.0	2700.0	1108.0	0.12	0.27

## Литература

1. СП 52-101-03. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры / Госстрой России. – М., 2003.
2. СНиП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции/Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 80 с.
3. СНиП 2.02.01-83\*. Основания зданий и сооружений/Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2002. – 48 с.
4. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия/Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1987. – 36 с.
5. СНиП II-7-81\*. Строительство в сейсмических районах/Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2000. – 44 с.
6. СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2003. – 139 с.
7. Изменение №1 СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции / Минстройархитектуры Республики Беларусь. – Минск: 2004. – 22 с.
8. СП 50-101-2004 Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений. –М., ФГУП ЦПП, 2005, 175с.
9. СП 22.13330.2011 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\*. М., ОАО ЦПП, 2011, 161с.
10. СП 20.13330.2011 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\* - М., ОАО ЦПП, 2011. -80с.



## 536 – Поле столбчатых фундаментов под железобетонные колонны



Программа предназначена для проектирования поля столбчатых фундаментов под железобетонные колонны согласно СП 52-101-03 [1] или СНиП 2.03.01-84\* [2] или СНБ 5.03.01-02 “Бетонные и железобетонные конструкции” [6] и СНиП 2.02.01-83\* “Основания зданий и сооружений” [3] или СП 50-101-2004 “Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений” [8] или СП 22.13330.2011 “Основания зданий и сооружений” [9]. Предусмотрено два типа сопряжения колонн с фундаментами: монолитное и заделка колонн в стаканы.

## 1. Расчетная схема

Под группой фундаментов в программе подразумеваются фундаменты под некоторое количество колонн, равномерно расположенных в пределах произвольно ориентированного прямоугольника на площадке. Прямоугольники задаются координатами диагонально расположенных вершин и углом ориентации, можно задать до 100 групп. В зависимости от введенных параметров, группа может представлять собой фундаменты, расположенные в пределах прямоугольника, вдоль линии или вообще одиночный фундамент. Размеры и схема армирования у всех фундаментов одной группы одинаковые, как исходные, так и полученные в результате расчета. Расчет фундамента состоит из двух частей. Сначала определяются размеры подошвы, исходя из расчетов основания по деформациям и несущей способности, а затем рассчитываются геометрические параметры и арматура фундамента.

### 1.1 Характеристики основания

Характеристики основания задаются по слоям. Сначала, для каждого слоя, выявленного в ходе инженерно-геологических изысканий на площадке, вводится его идентификационное имя и механические характеристики, пустое поле имени завершает ввод. В качестве механических характеристик вводятся: удельный вес, модуль деформации, угол внутреннего трения и удельное сцепление. Расчетное сопротивление грунта для каждого слоя может быть либо задано непосредственно, либо вычислено в программе по пп. 2.41, 2.47 СНиП 2.02.01-83\* или пп.5.5.8, 5.5.24 СП 50-101-2004 или пп.5.5.8, 5.5.24 СП 22.13330.2011. В последнем случае, необходимо дополнительно задать тип грунта в каждом слое. Допускаются следующие типы грунтов: пылевато-глинистые, песчаные, крупнообломочные и скальные.

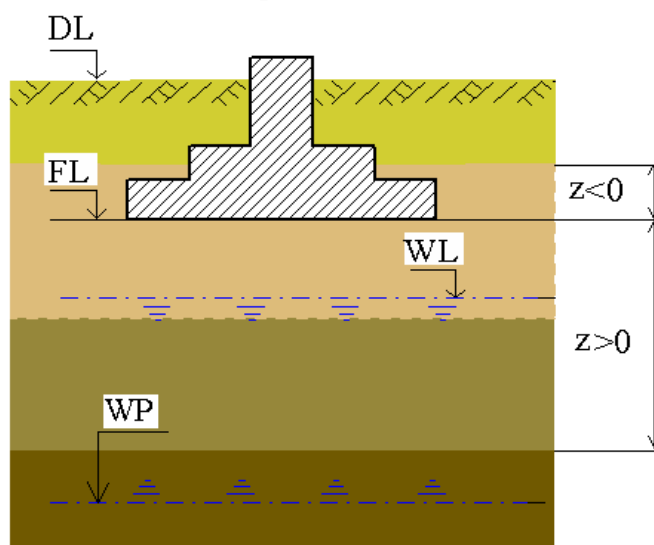


Рис. 1. Схема задания характеристик основания

Затем, для каждой скважины задаются ее координаты и расположение пластов под ними. Каждый пласт задается координатой его верхней границы, отсчитываемой от подошвы

фундамента и ссылкой на ранее введенный тип грунта. Кроме того, задаются отметки уровней грунтовых вод и водоупорного слоя. Отрицательная координата задает слой, лежащий выше подошвы, пустые поля координат скважины завершают ввод.

## 1.2 Характеристики фундамента

Исходными данными для расчета фундамента являются его геометрические характеристики и классы бетона и стали продольной и поперечной арматуры. Геометрические характеристики задаются для каждой группы либо непосредственным вводом значений, либо ссылкой на ранее введенные для другой группы. Заданные геометрические характеристики: размеры подошвы, толщина плиты, размеры ступенек и подколонника рассматриваются как минимальные, если заданы соответствующие приращения или как неизменяемые при нулевых приращениях.

## 2. Нагрузки

Нагрузки для каждой группы задаются в крайних угловых колоннах. Для остальных колонн нагрузки вычисляются в программе интерполированием по двум (в случае расположения колонн вдоль линии) или четырем точкам.

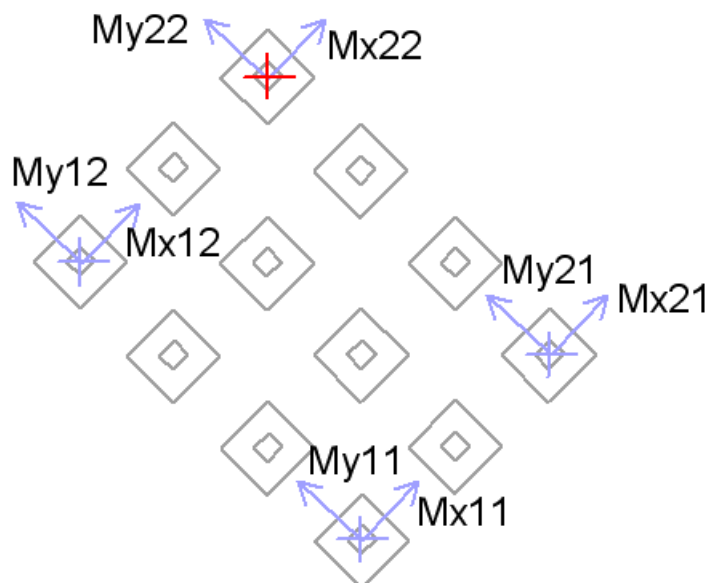


Рис. 2. Схема задания нагрузок в группе

Вертикальная сила  $N$ , горизонтальные силы  $Q_x$ ,  $Q_y$  и моменты  $M_x$ ,  $M_y$  передаются на фундамент в центре сечения колонны на уровне верхнего обреза фундамента. Положительные направления сил и векторов моментов соответствуют направлениям осей координат.

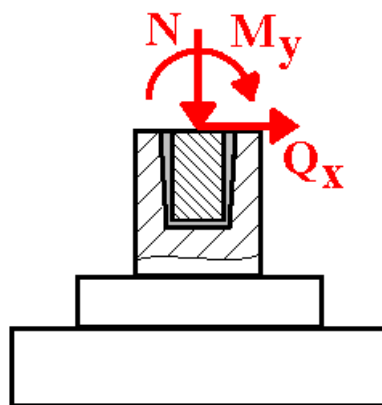


Рис. 3. Схема приложения нагрузок

Разделение нагрузок по категориям и вычисление РСУ производится либо по СНиП 2.01.07-85 “Нагрузки и воздействия” [4] или СП 20.13330.2011 “Нагрузки и воздействия” [10], либо по Приложению А СНБ 5.03.01-02 [6] или по Приложению А.1 СТБ ЕН 1990-2007 “Основы проектирования несущих конструкций”. Сочетания нагрузок для всех расчётов строятся автоматически. Возможно задание как нагрузок, так и готовых расчётных сочетаний нагрузок.

### 3. Расчет основания, выбор размеров подошвы фундамента

Расчет основания по несущей способности проводится для всех возможных основных и особых сочетаний нагрузок. Сначала производится расчет основания по несущей способности по пп. 2.58 – 2.62 СНиП 2.02.01-83\* или пп.5.6.2 - 5.6.11 СП 50-101-2004 или пп.5.7.2 - 5.7.11 СП 22.13330.2011 с размерами подошвы, заданными пользователем. При наличии под подошвой фундамента нескольких слоев нескальных грунтов, угол внутреннего трения и удельное сцепление осредняются по обертывающей поверхности скольжения, а удельный вес – по объему внутри нее (рис. 4).

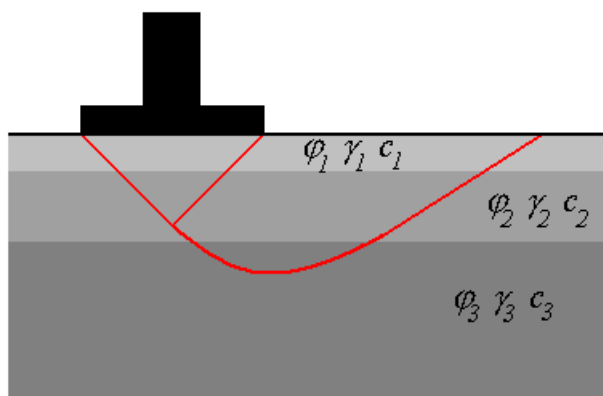


Рис. 4. Область осреднения характеристик грунта

Если заданы приращения размеров подошвы, и не выполнено условие (11) [3], то программа увеличивает площадь подошвы, пока несущая способность основания не станет достаточной.

Далее программа проводит расчет основания по деформациям для всех возможных основных сочетаний нагрузок. При этом на первом этапе проверяются требования пп. 2.41, 2.47 – 2.49 [3] (или аналогичные требования других норм) и, если для какого-нибудь сочетания нагрузок среднее давление под подошвой и/или краевое и/или угловое давление превышает расчетное сопротивление грунта, программа увеличивает размеры подошвы фундамента в направлении, соответствующем типу превышения.

Затем производится расчет деформаций основания по формулам и таблицам приложения 2 [3] (или аналогичных требований других норм). При этом, выбор расчетной схемы для СНиП

2.02.01-83\* производится в соответствии с п. 2.40 [3], а для других норм применяется схема деформируемого полупространства. При превышении допустимой осадки и/или крена фундамента производится пошаговое увеличение размеров подошвы фундаментов в тех группах, где эти величины превышены.

#### 4. Выбор размеров фундамента и расчет арматуры

Толщина плиты фундамента определяется из расчета на продавливание таким образом, чтобы требования п. 3.42 [2] или 3.2.6.2 [1] или 7.4.3 [6] удовлетворялись без установки поперечной арматуры, но не меньше заданного пользователем значения. Размеры подколонника, заданные пользователем, могут быть увеличены, если это требуется для обеспечения прочности сечений, наклонных к плоскости плиты, и заданы соответствующие приращения размеров. Затем с целью уменьшения объема, плита делится на две или три ступеньки, размеры которых рассчитываются исходя из требований прочности на продавливание и обеспечения прочности наклонных сечений без установки поперечной арматуры.

Требуемая арматура плиты определяется исходя из расчетов ее по [1] или [2], или [6], как изгибаемого элемента, по предельным состояниям первой и второй групп. Расчеты проводятся отдельно на изгиб в плоскостях XZ и YZ для всех возможных основных и особых сочетаний усилий. При этом реактивное давление грунта на подошву определяется с учетом возможного ее отрыва от основания и без учета веса плиты и грунта над ней. Расчет проводится для нескольких сечений: в центре плиты и по граням ступенек. Для рассчитанных значений требуемой по условиям прочности арматуры подбирается диаметр и шаг расположения арматурных стержней.

Расчет поперечной арматуры стакана проводится в предположении линейного распределения контактного давления по длине заделанной части колонны (рис. 4).

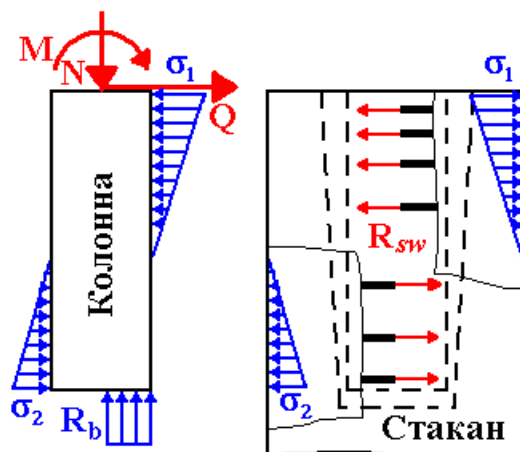


Рис. 4. Расчет поперечной арматуры стакана

Диаметр и расположение хомутов подбираются так, чтобы в предельном состоянии, усилия в них  $R_{sw}$  уравновешивали давление колонны на стенки стакана. Расчет проводится на все возможные основные и особые сочетания усилий.

Продольная арматура стакана рассчитывается для двух сечений: коробчатого сечения на уровне дна стакана и прямоугольного сечения в месте соединения подколонника с плитой. Расчеты проводятся для всех возможных основных и особых сочетаний усилий с симметричным армированием стакана в каждой плоскости изгиба. Для максимальных рассчитанных значений требуемой арматуры подбираются диаметр и шаги расположения арматурных стержней.

Косвенная арматура подколонника рассчитывается по п. 3.41 [2] или 3.2.5.3 [1] или 7.4.1 [6] для всех возможных основных и особых сочетаний усилий. Для максимального значения требуемой

арматуры подбираются параметры арматурных сеток (диаметр и шаг), а также количество сеток и расстояние между ними.

При некоторых сочетаниях нагрузок, в плите могут возникать изгибающие моменты противоположного знака, т.е. растягивающие верхние волокна. В этом случае, производится проверка несущей способности бетонного сечения плиты по п. 3.8 [2] и, при недостаточной прочности бетонного сечения, производится расчет и подбор арматуры верхней части плиты.

## 5. Вывод результатов

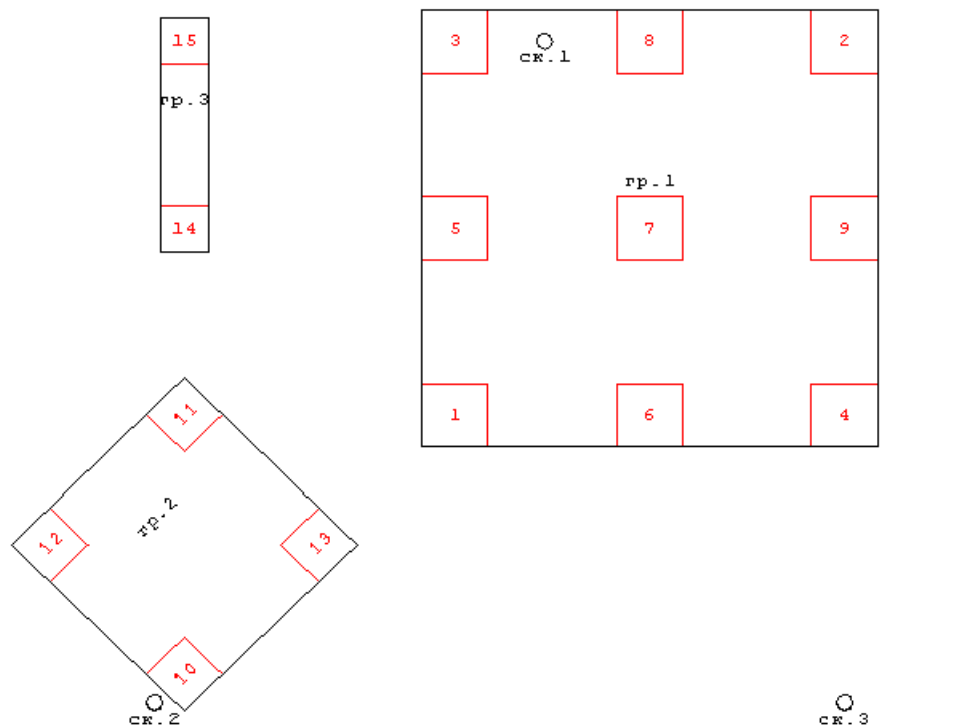
### 5.1 Исходные данные

Выводится заданный пользователем план фундамента:

Данные для расчета

План фундамента

M = 1 : 245



Колонны: положение и нумерация	№ 1			№ 2			№ 3		
	кол.	грп.	x [м]	y [м]	угол грд.	кол.	грп.	x [м]	y [м]
1	1	1.0	1.0	0.0	2	1	14.0	14.0	0.0
3	1	1.0	14.0	0.0	4	1	14.0	1.0	0.0
5	1	1.0	7.5	0.0	6	1	7.5	1.0	0.0
7	1	7.5	7.5	0.0	8	1	7.5	14.0	0.0
9	1	14.0	7.5	0.0					
10	2	-8.0	-8.0	45.0	11	2	-8.0	1.0	45.0
12	2	-12.5	-3.5	45.0	13	2	-3.5	-3.5	45.0
14	3	-8.0	7.5	0.0	15	3	-8.0	14.0	0.0

Выводится таблица характеристик грунтов и расположение пластов в каждой из скважин:

Грунт	нормативные значения характеристик грунтов.						
	№	тип	$\rho$ [кН/м <sup>3</sup> ]	E [МПа]	$f_i$ [град]	$c/R_c$ [кПа]	R [кПа]
	1	слой1	18.00	40.00	25.00	0.0	400.0
	2	слой2	20.00	30.00	30.00	0.0	500.0
	3	слой3	19.00	40.00	25.00	5.0	600.0
Скважины	Сооружение I класса $\gamma_s=1.20$						
	№	координаты скважин и расположение слоев					
	1	x=4.00м	y=14.00м	WL=10.00м	WP=30.00м		
		z [м]	0.00	5.00	9.00		
		№грн	1	2	3		
	-----						
	2	x=-9.00м	y=-9.00м	WL=10.00м	WP=30.00м		
		z [м]	0.00	4.00	8.00		
		№грн	1	2	3		
	-----						
	3	x=14.00м	y=-9.00м	WL=10.00м	WP=30.00м		
		z [м]	0.00	4.00	9.00		
		№грн	1	2	3		

Выводятся нагрузки в основании угловых колонн каждой группы:

Нагрузки	№	№	N	Mx	My	Qx	Qy				
	нагр.	колонны	[кН]	[кН*м]	[кН*м]	[кН]	[кН]				
1	Постоянная	$\gamma_s=1.00$	1	1000.0	10.0	7.0	-10.0	-8.0			
			2	1000.0	-10.0	-7.0	10.0	8.0			
			3	1000.0	-10.0	4.0	-10.0	8.0			
			4	1000.0	6.0	-10.0	10.0	-8.0			
			10	800.0	-6.0	-4.0	-5.0	-5.0			
			11	1200.0	8.0	4.0	5.0	5.0			
			12	800.0	10.0	0.0	-6.0	5.0			
			13	1200.0	-0.0	2.0	6.0	-5.0			
			14	1000.0	5.0	0.0	-2.0	-5.0			
			15	1000.0	-5.0	0.0	-2.0	5.0			
			-----								
			2	Длительная	$\gamma_s=1.30$	1	1000.0	12.0	5.0	-20.0	-5.0
						2	900.0	-12.0	-2.0	20.0	9.0
						3	900.0	-2.0	2.0	-20.0	8.0
						4	1000.0	2.0	-5.0	20.0	-4.0
10	700.0	-3.0				3.0	-9.0	5.0			
11	800.0	3.0				0.0	4.0	-2.0			
12	800.0	2.0				0.0	-4.0	-2.0			
13	700.0	-2.0				3.0	9.0	3.0			
14	600.0	-2.0				2.0	-4.0	-2.0			
15	600.0	4.0				2.0	4.0	-2.0			

## 5.2 Расчетные сочетания усилий

Расчеты в программе проводятся для всех возможных сочетаний усилий, но в разделе “PCY” выводятся силовые факторы и коэффициенты только для тех расчетных сочетаний усилий, которые оказались существенными для какого-либо из расчетов, проведенных программой.



Кoeffициенты существенных РСУ	Наг- Кoeffициенты РСУ				Наг- Кoeffициенты РСУ			
	руж. 1	2	3	4	руж. 1	2	3	4
	1	1.00	1.00		2	1.00	1.30	
Существенные РСУ	№	№	№	N	Mx	My	Qx	Qy
	1	1	1	2000.0	22.0	12.0	-30.0	-13.0
	2	1	11	2000.0	11.0	4.0	9.0	3.0
	3	1	14	1600.0	3.0	2.0	-6.0	-7.0
	4	2	2	1000.0	-10.0	-7.0	10.0	8.0
	5	2	12	800.0	10.0	0.0	-6.0	5.0
	6	2	14	1000.0	5.0	0.0	-2.0	-5.0
	7	2	1	1000.0	10.0	7.0	-10.0	-8.0
	8	2	10	800.0	-6.0	-4.0	-5.0	-5.0
	9	2	15	1780.0	0.2	2.6	3.2	2.4
	10	2	1	2300.0	25.6	13.5	-36.0	-14.5
	11	1	6	2000.0	15.0	-1.5	0.0	-12.5
	12	1	3	1900.0	-12.0	6.0	-30.0	16.0

### 5.3 Расчет основания

Для фундамента, у которого по расчету получилась максимальная осадка, выводятся расчетное сопротивление основания и результаты расчета осадки. Аналогично выводятся результаты несущей способности основания для фундамента, у которого реализовалось наиболее опасное соотношение нагрузки и несущей способности грунта.

Расчет по деформациям

Схема линейно деформируемого полупространства.  
 Наибольшая осадка достигается при РСУ № 1.  
 Глубина сжимаемой толщи  $H_c=9.32$  м  
 Среднее давление под подошвой  $p=388.5$  кПа  
 Краевое давление вдоль оси у  $p_y=422.4$  кПа  
 Краевое давление вдоль оси x  $p_x=415.0$  кПа  
 Давление в угловой точке  $p_{xy}=448.8$  кПа  
 Расчетное сопротивление грунта  $R=400.0$  кПа  
 Осадка фундамента  $s=1.9$  см <  $s_u=5.0$  см  
 Наибольший крен достигается при РСУ №12,  
 Крен фундамента  $i=0.0005$  <  $i_u=0.0050$   
 Наибольшая неравномерность осадок при РСУ №11,  
 между фундаментами № 6 и № 12  
 Неравномерность осадок  $i=0.0003$  <  $i_u=0.0010$

Расчет по несущей способности

Наиболее опасным по устойчивости является РСУ №10.  
 Макс. глубина поверхности скольжения  $z_m=3.58$  м  
 Осредненные по области скольжения параметры грунта  
 $\gamma_m=18.0$  кН/м<sup>3</sup>  $f_i=30.0$  град.  $c=0.0$  кПа  
 Сила предельного сопротивления грунта  $N_u=9938$  кН

### 5.4 Результаты расчета фундамента

Для каждой группы в табличной форме и в виде эскиза приводятся вычисленные на различных этапах расчета размеры плиты и подколонника.

Результаты расчета	геометрических характеристик фундамента.			
	Объект	размеры по X и по Y		высота h
		[см]	[см]	[см]
плита 1		270.0	270.0	30.0
плита 2		168.0	168.0	12.0
плита 3		124.0	124.0	12.0
плита 4		270.0	30.0	0.0
подколонник		90.0	90.0	146.0

Схема фундамента вид сбоку  
 М = 1 : 23

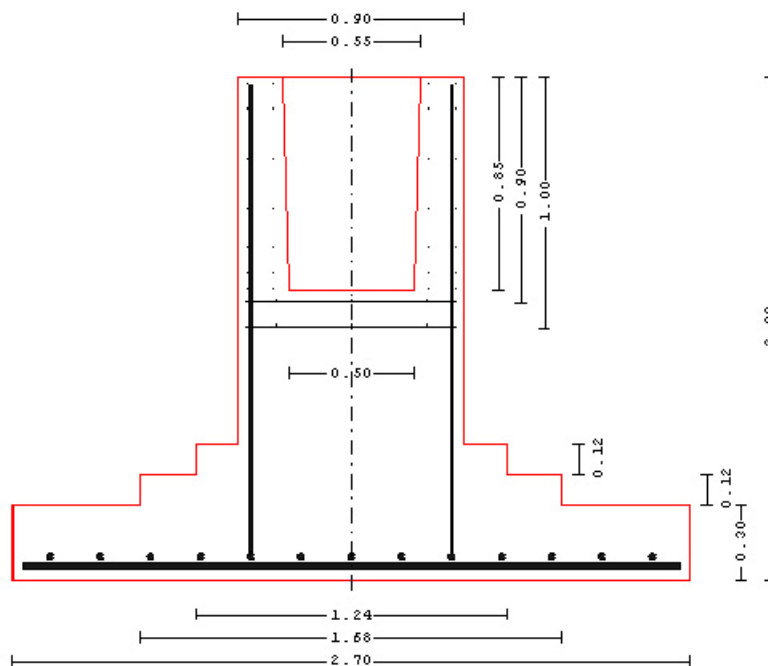
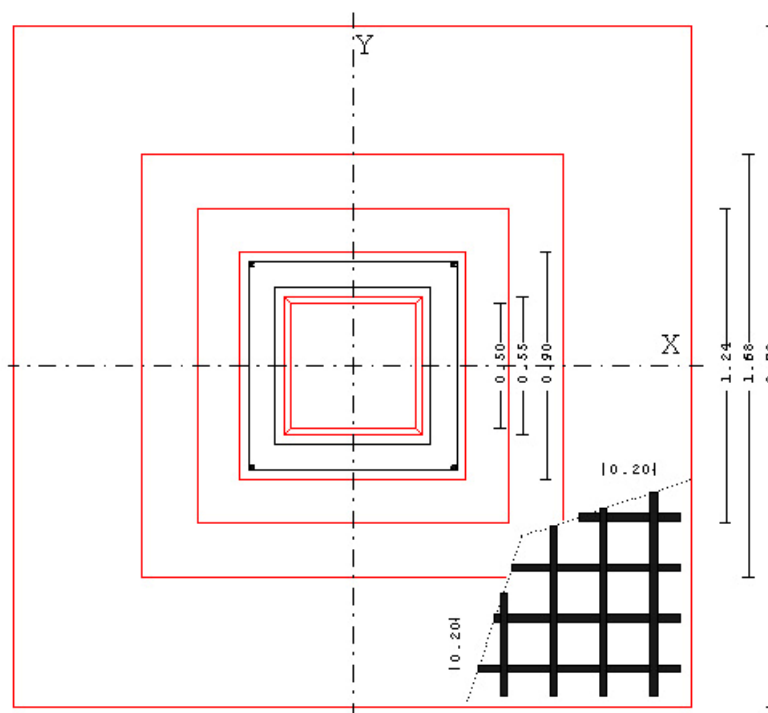


Схема фундамента вид сверху  
 М = 1 : 23



## 5.5 Расчет железобетонного фундамента

В этом разделе приводятся результаты расчета плиты фундамента на продавливание, расчетов продольной, поперечной и косвенной арматуры, а также проверки ширины раскрытия трещин. Расчеты приводятся для каждой группы фундаментов отдельно.

**Продавливание.**

Расчет на продавливание по СНиП 52-01-03.  
Тяжелый Яетон. Класс прочности В15.

Плита РСУ	Lx	Ly	Ab	Wbx	Wby	r
	[м]	[м]	[м <sup>2</sup> ]	[м <sup>3</sup> ]	[м <sup>3</sup> ]	
1	1	3.977	3.022	2.051	3.432	0.000 0.90
2	1	2.208	2.243	4.584	3.496	3.304 0.95
3	1	1.698	1.673	5.291	3.008	2.935 0.94

**Расчет арматуры**

по СНиП 52-01-03, с использованием трехлинейной диаграммы состояния Яетона.

Класс арматурной стали: А500

Арматура плиты  
Нижняя арматура

Ось прутка	Коорд. [м]	PCY	Мизг [кН*м]	h [см]	As [см <sup>2</sup> ]	d [мм]	n
X	1.86	1	71.0	25.8	11.1		
X	0.84	1	1101.9	52.8	49.4		
X	0.00	1	2856.2	79.8	85.4	25	22
Y	1.39	1	338.7	23.3	35.8		
Y	0.87	1	963.0	50.3	45.1		
Y	0.00	1	2700.0	77.3	83.3	25	22

Нижние прутки ориентированы по оси X.

Верхняя арматура

и проверка плиты на действие оЯратного момента.

Плита	PCY	Мизг [кН*м]	Rbt*Wp1 [кН*м]	As [см <sup>2</sup> ]	n	d [мм]	s [мм]
1	Y	4	338.44	85.05	26.53	22	14 200
1	X	4	419.02	83.31	33.41	22	14 200
2	Y	4	338.44	433.42			
2	X	4	419.02	339.16	16.72	15	12 300
3	Y	4	338.44	398.25			
3	X	4	419.02	365.78	11.22	11	12 400

Поперечная арматура стакана

Класс арматурной стали: А300

Ось	Z [см]	PCY	p [кН/м]	As/s [см <sup>2</sup> /м]	s [мм]	d [мм]	n
X	4.2	3	3966.9	184.5	40	16	4
X	8.2	3	2784.1	129.5	50	16	4
X	13.2	3	2062.8	95.9	50	16	4
X	18.2	3	1341.5	62.4	100	16	4
X	28.2	3	101.0	4.7	100	16	4
X	38.2	3	1543.5	71.8	50	16	4
X	43.2	3	2264.8	105.3	50	16	4
X	48.2	3	2986.0	138.9	40	16	4
X	52.2	3	3563.0	165.7	40	16	4
X	56.2	3	3966.9	184.5	40	16	4

Косвенная арматура

Координата Z принимается от верхнего края стакана. подколонника. Класс арматурной стали: А300

Продольная арматура

НаиЯолее опасное РСУ N 1. 2 сетки с шагом 100мм. Сетки из прутков диаметром 10мм, с шагом 100мм.

**Трещиностойкость**

подколонника. Класс арматурной стали: А500  
НаиЯолее опасное РСУ N1. Диаметр прутков 14мм. 28 прутков с шагом по оси X 100мм, по оси Y 100мм. Предельно допустимая ширина раскрытия трещин принимается из условия оЯеспечения сохранности арматуры asrc1=0.40мм asrc2=0.30мм

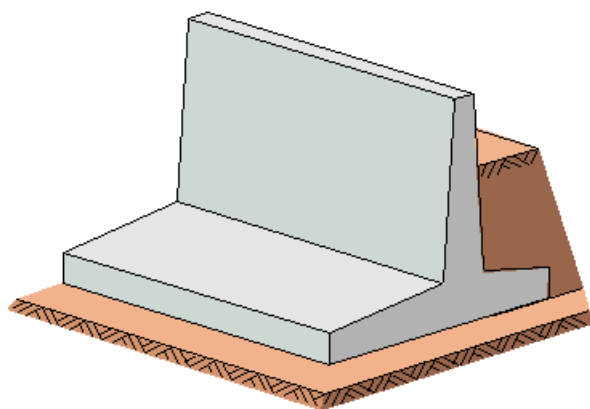
Плита

Ось	Коорд. [м]	PCY	Мизг2 [кН*м]	Мизг1 [см <sup>2</sup> ]	Мсгс [кН*м]	асгс2 [мм]	асгс1 [мм]
X	1.86	2	1	42.6	71.0	165.3	0.00 0.00
X	0.84	2	1	658.2	1101.9	547.4	0.06 0.14
X	0.00	2	1	1698.6	2856.2	1127.8	0.14 0.29
Y	1.39	2	1	196.4	338.7	151.4	0.05 0.11
Y	0.87	2	1	558.6	963.0	529.7	0.04 0.12
Y	0.00	2	1	1566.0	2700.0	1108.0	0.12 0.27

## Литература

1. СП 52-101-03. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры / Госстрой России. – М., 2003.
2. СНиП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции/Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 80 с.
3. СНиП 2.02.01-83\*. Основания зданий и сооружений/Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2002. – 48 с.
4. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия/Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1987. – 36 с.
5. СНиП II-7-81\*. Строительство в сейсмических районах/Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2000. – 44 с.
6. СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2003. – 139 с.
7. Изменение №1 СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции / Минстройархитектуры Республики Беларусь. – Минск: 2004. – 22 с.
8. СП 50-101-2004 Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений. –М., ФГУП ЦПП, 2005, 175с.
9. СП 22.13330.2011 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\*. М., ОАО ЦПП, 2011, 161с.
10. СП 20.13330.2011 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\* - М., ОАО ЦПП, 2011. -80с.

## 545 – Подпорная стенка углового профиля



Программа рассчитывает и проектирует железобетонную подпорную стенку углового профиля с консолями и без консолей для слоистого грунта, наклонной местности за подпорной стенкой и произвольного уровня грунтовых вод. В качестве нагрузки допускается ввод равномерно распределенных на отрезке и сосредоточенных нагрузок на поверхность, нагрузок от фундаментов и нагрузок, приложенных к верху стенки ( $V$ ,  $H$ ,  $M$ ). Расчет устойчивости положения стенки производится на основании СНиП 2.02.01-83\* и СНиП 2.09.03-85. Расчет требуемой арматуры осуществляется согласно СНиП 2.03.01-84\* "Бетонные и железобетонные конструкции", либо по СП 52-101-03 "Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры", либо по СНБ 5.03.01-02 "Бетонные и железобетонные конструкции".

## 1. Расчетная схема

Подпорную стенку можно рассчитывать с консолями и без них. Консоли могут иметь различную высоту стенки на срезе и на стыке со стенкой. Можно задать наклон подошвы подпорной стенки  $\beta$ . Вертикальные грани стенки также могут быть наклонными как с лицевой стороны  $\alpha'$ , так и с тыльной  $\alpha$ . Поверхность за подпорной стенкой может иметь произвольный наклон. Можно предусмотреть до 10 слоев грунта с различными характеристиками. Уровень грунтовых вод по разные стороны стенки можно задать различным.

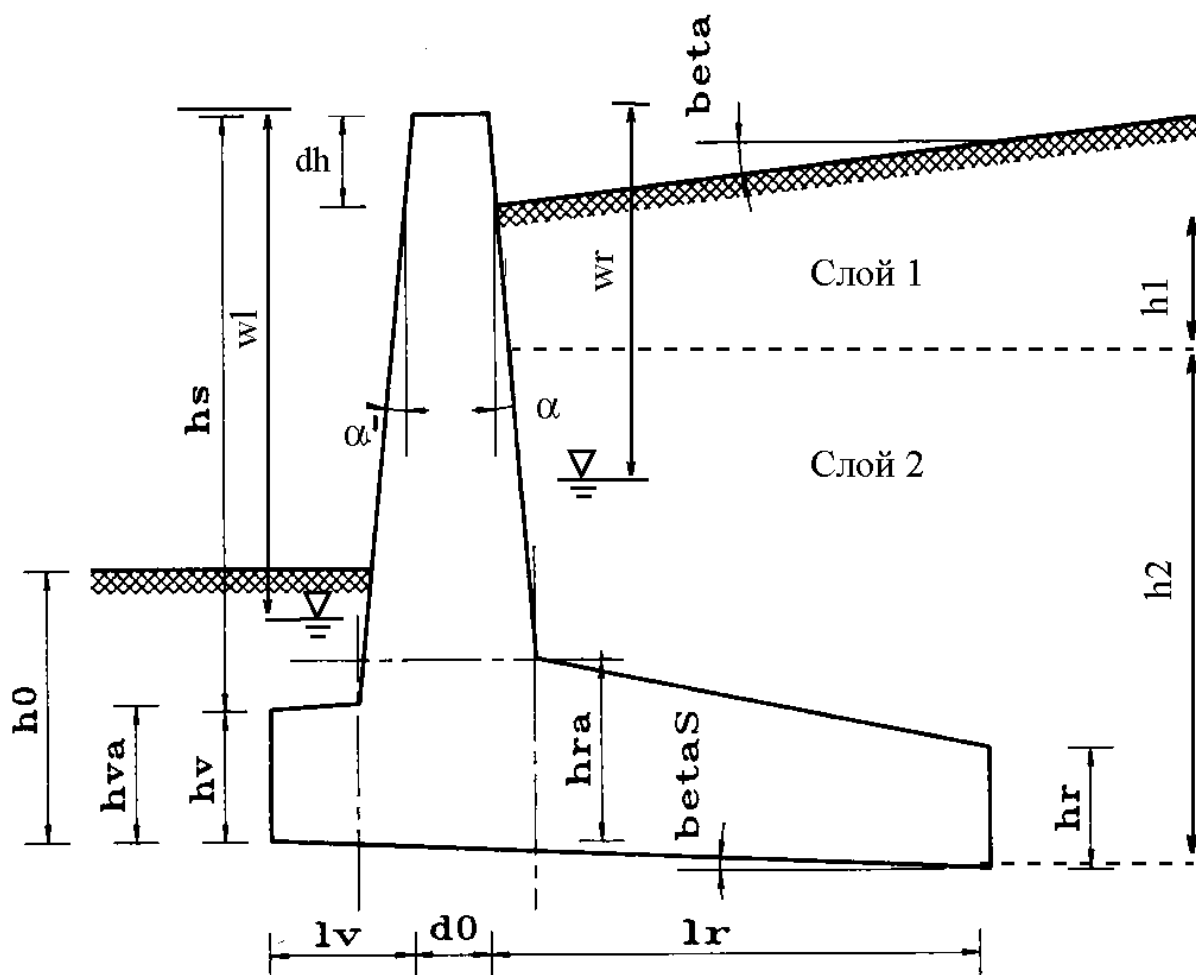


Рисунок 1: Расчетная схема

## 2. Нагрузки

Все нагрузки относятся к фрагменту стены шириной 1 м.

Максимальное суммарное количество нагрузок одного типа во всех нагружениях – 5.

Можно задавать нагрузки следующих типов:

- равномерно распределенные нагрузки на поверхность с лицевой и тыльной стороны;
- блочные нагрузки на поверхность с лицевой и тыльной стороны;
- сосредоточенные нагрузки на поверхность с лицевой и тыльной стороны;
- нагрузки от фундамента;
- нагрузки, приложенные к верхней части стенки.

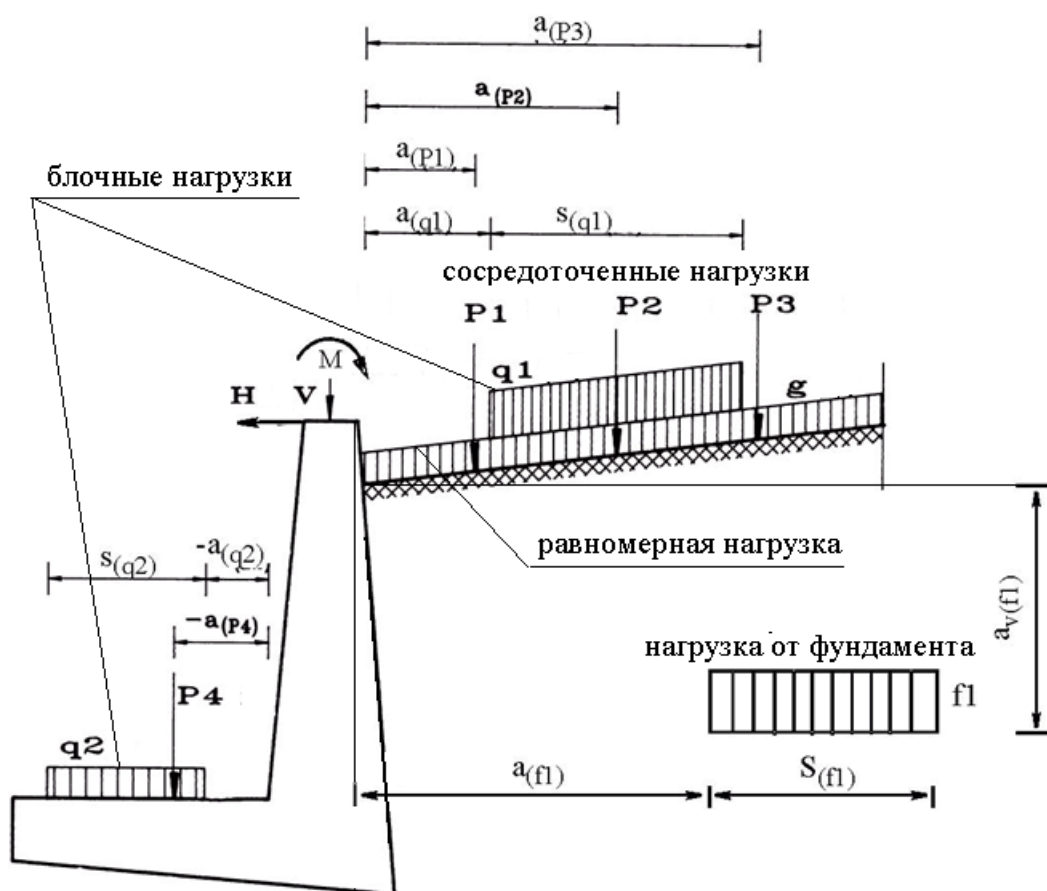


Рисунок 2: Нагрузки

## 3. Расчет давления грунта

Считается, что на подпорную стенку со стороны засыпки действует активное давление грунта, величина которого рассчитывается, исходя из теории предельного равновесия Кулона.

Поскольку в программе допускаются неплоские поверхности засыпки, прямое использование соотношений [5] для расчета давления грунта невозможно. В программе применяются другие методы, приводящие, в частном случае плоской поверхности засыпки, к тем же результатам.

### 3.1 Метод Кульмана

Расчет давления грунта происходит по методу Кульмана [6, гл. 2]. Используется метод Кульмана с плоской поверхностью скольжения. Для многослойных грунтов, при использовании общей поверхности скольжения для искомого определяющего давления грунта, применяется приближенное решение, содержащее необходимую для практических целей точность обычных статических расчетов грунта. Для каждого слоя, путем вариации углов поверхностей скольжения, вычисляется сила давления грунта в центре и по краям области. При вариации углов поверхностей скольжения исследуются все принудительные поверхности скольжения, возникающие от нагрузок (начальной и конечной точек приложения нагрузок). Благодаря чему, между данными принудительными поверхностями скольжения получают участки непрерывных эпюр силы давления грунта по Кульману. Последующее суммирование сил давления на участках позволяет точно рассчитать определяющее значение общего давления грунта.

Эпюра сил давления грунта в области каждого слоя характеризуется тремя значениями. Путем дифференцирования, мы получаем в пределах слоя линейную эпюру давления грунта. При необходимости получить более подробную эпюру давления грунта, можно разделить рассматриваемый слой на несколько других, имеющих одинаковые характеристики грунта.

### 3.2 Давление грунта для проверки устойчивости

При наличии у подпорной стенки задней консоли со стороны засыпки, возникает клиновидная призма скольжения с вершиной у среза консоли ([5], п. 2.16). Варьируя углы наклона первой и второй поверхностей скольжения, можно определить наиболее опасные их значения и результирующее активное давление грунта.

### 3.3 Давление грунта для конструктивного расчета стены

Для определения изгибающих моментов в стенке и расчета требуемой арматуры, необходимо знать давление грунта на вертикальную поверхность стенки. Оно определяется как активное давление грунта на наклонную стенку по методу Кульмана с плоскими поверхностями скольжения.

## 4. Проверка устойчивости угловой подпорной стенки

Программа выполняет следующие проверки устойчивости стенки:

- проверка эксцентриситета *равнодействующей* приложенных к стенке сил; в зависимости от заданного пользователем значения, она должна находиться не далее  $1/3$  или  $1/6$  от середины подошвы;
- проверка стенки на опрокидывание путем сравнения опрокидывающего момента относительно нижней угловой точки передней консоли с удерживающим моментом;
- проверка несущей способности основания стенки по п. 2.21 СНиП 2.09.03-85 и пп. 2.57-2.62 СНиП 2.02.01-83\*;
- проверка устойчивости положения стенки против сдвига по п. 2.19 СНиП 2.09.03-85;
- проверка устойчивости массива грунта со стенкой на глубинный сдвиг по круглоцилиндрической поверхности скольжения по приложению 8 СНиП 2.02.02-85.

При невыполнении одной из перечисленных проверок, все размеры, для которых пользователем заданы приращения, пошагово увеличиваются до достижения положительного результата.



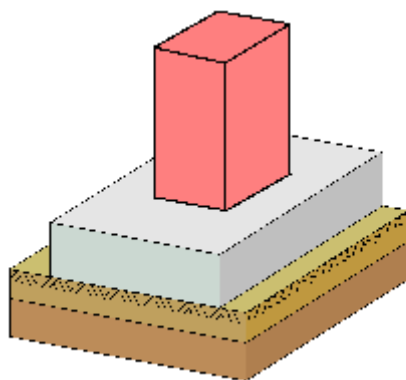
## **5. Расчет прочности железобетонной конструкции стенки**

Исходя из действующих на стенку усилий: активного давления грунта и давления отпора со стороны основания на подошву стенки, в программе рассчитываются внутренние силовые факторы (изгибающие моменты, продольные и поперечные силы) в ряде сечений по высоте стенки и в местах стыка консолей со стенкой. Далее, согласно СП 52-101-03 или СНиП 2.03.01-84\* или СНБ 5.03.01-02, вычисляются значения требуемой продольной и поперечной арматуры.

## Литература

1. СП 52-101-03. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры / Госстрой России. – М., 2003.
2. СНиП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции/Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 80 с.
3. СНиП 2.02.01-83\*. Основания зданий и сооружений/Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2002. – 48 с.
4. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия/Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1987. – 36 с.
5. СНиП 2.09.03-85. Сооружения промышленных предприятий/Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 102 с.
6. Снитко Н.К. Статическое и динамическое давление грунтов и расчет подпорных стенок/Строиздат. – Л.: 1970. -207с.
7. СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции / Минстройархитектуры Республики Беларусь. – Минск: 2003. – 139 с.
8. Изменение №1 СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции / Минстройархитектуры Республики Беларусь. – Минск: 2004. – 22 с.
9. СНиП 2.02.02-85. Основания гидротехнических сооружений/Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 65 с.

## 550 – Расчет оснований



Программа предназначена для определения деформаций основания (осадки, просадки), а также для подбора размеров подошвы фундамента согласно СНиП 2.02.01-83\* [1] или СП 50-101-2004 [2]. Расчетная схема основания при расчете осадки согласно [1] принимается либо в виде линейно-деформируемого полупространства, либо в виде линейно-деформируемого слоя. Расчетной схемой основания, согласно [2], является линейно-деформируемое полупространство. Предусмотрен учет влияния подземных вод. Наряду с нормативным расчетом осадки, который проводится в предположении линейного распределения давления на грунт, предусмотрен альтернативный расчет в предположении линейного распределения перемещений точек подошвы.

## 1. Фундамент

Рассматривается фундамент, подошва которого имеет форму прямоугольника со сторонами  $l_x, l_y$  вдоль осей  $x, y$ . Оси  $x, y$  направляются по осям симметрии прямоугольника. Фундамент рассматривается как ленточный фундамент шириной  $b = l_y$  при  $l_x \geq 10l_y$ . Глубина заложения фундамента от уровня планировки равна  $d$ , а от поверхности природного рельефа -  $d_n$ . При определении расчетного сопротивления грунта учитывается наличие подвала.

## 2. Грунт

Грунт, расположенный под подошвой фундамента, может состоять из нескольких горизонтальных слоев с различными физико-механическими характеристиками (рис.1). Слои нумеруются в направлении от подошвы фундамента вглубь основания. Возможно задание до 20 слоев.

При расчете осадки предполагается, что последний заданный слой подстилается скальным грунтом. При отсутствии скального грунта, суммарная толщина слоев должна превышать сжимаемую толщину.

При наличии подземных вод, задается номер слоя грунта, кровля которого находится на уровне подземных вод. При наличии водоупора, задается номер слоя глинистого грунта, в котором практически отсутствует фильтрация подземных вод. Удельный вес грунта, залегающего ниже уровня подземных вод, но выше водоупора, принимается с учетом взвешивающего действия воды. При наличии водоупора, учитывается давление воды на кровлю водоупорного слоя. На эпюре напряжения от собственного веса грунта, на уровне кровли водоупорного слоя, возникает скачок.

При расчете осадки задается удельный вес  $\gamma_s$  твердых частиц грунта, удельный вес  $\gamma$  грунта природной влажности, коэффициент пористости  $e$ , удельное сцепление  $c$ , угол внутреннего трения  $\varphi$ , модуль деформации  $E$ . Для глинистого грунта дополнительно задается показатель текучести  $I_L$ . Значения  $c$ ,  $\varphi$ ,  $E$  для грунта, залегающего ниже уровня подземных вод, но выше водоупора, должны задаваться для водонасыщенного состояния. Удельный вес грунта в водоносном слое, с учетом взвешивающего действия воды, определяется автоматически по формуле:

$$\gamma_{sb} = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1 + e}$$

где  $\gamma_w$  - удельный вес воды ( $\gamma_w = 10 \text{ кН/м}^3$ ).

Схема геологического разреза

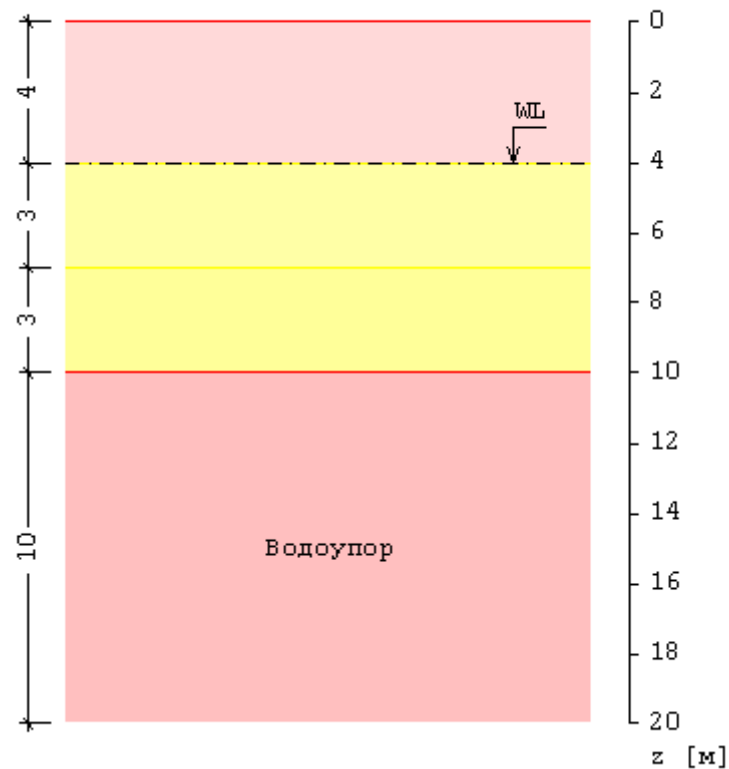


Рис.1. Пример задания грунта

При расчете просадки задается один или несколько слоев просадочного грунта, залегающего ниже уровня подошвы фундамента. Для каждого слоя задается удельный вес  $\gamma_s$  твердых частиц, коэффициент пористости  $e$ , зависимость относительной просадочности  $\varepsilon_{sl}$  от давления  $p$  (рис.2), полученная при испытаниях просадочного грунта в компрессионном приборе согласно [3]. Расчет просадки производится при условии замачивания просадочного грунта сверху до полного водонасыщения. Удельный вес грунта выше уровня подошвы задается для водонасыщенного состояния. Удельный вес грунта ниже уровня подошвы определяется автоматически по формуле:

$$\gamma_{sat} = \frac{\gamma_s + e\gamma_w}{1 + e}$$

### 3. Нагрузка

При расчете осадки задаются вертикальная сила  $N$  и моменты  $M_x, M_y$  относительно осей  $x, y$ , а при расчете просадки задается только вертикальная сила  $N$ . При расчете ленточного фундамента задаются погонные нагрузки.

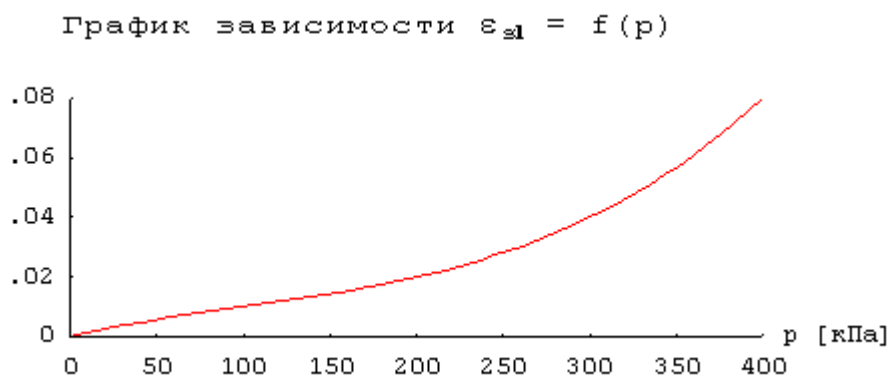


Рис.2. Пример зависимости относительной просадочности от давления

#### 4. Расчет осадки

Расчет включает проверку допустимости давления на грунт основания. Предполагается, что давление распределяется по подошве фундамента по линейному закону. При наличии моментной нагрузки, возможен отрыв края фундамента от основания. В зоне отрыва давление равно нулю. Условия проверки, в общем случае, имеют вид:

$$p/R \leq 1$$

$$p_{\text{max},x}/1.2R \leq 1$$

$$p_{\text{max},y}/1.2R \leq 1$$

$$p_{\text{max}}/1.5R \leq 1$$

Здесь  $p$  - среднее давление,  $p_{\text{max},x}$  - наибольшее давление по оси  $x$ ,  $p_{\text{max},y}$  - наибольшее давление по оси  $y$ ,  $p_{\text{max}}$  - наибольшее давление в угловой точке,  $R$  - расчетное сопротивление грунта.

Расчетное сопротивление грунта  $R$  вычисляется по формуле (7) [1] или по формуле (5.5) [2]. Предусмотрено повышение значения  $R$  согласно нормативным указаниям. Предусмотрено задание расчетного сопротивления грунта согласно таблицам приложения 3 [1] или приложения Д [2].

Расчетная схема основания, согласно [1], принимается либо в виде линейно-деформируемого полупространства с условным ограничением глубины сжимаемой толщи  $H_c$ , либо в виде линейно-деформируемого слоя толщиной  $H$  ( $H < H_c$ ), если выполняется одно из следующих условий:

а) в пределах сжимаемой толщи  $H_c$  залегает слой грунта с модулем деформации  $E_1 \geq 100$  МПа и толщиной  $h_1$ , удовлетворяющей условию:

$$h_1 \geq H_c (1 - \sqrt[3]{E_2/E_1})$$

где  $E_2$  - модуль деформации грунта, подстилающего слой грунта с модулем деформации  $E_1$ ;

б) ширина фундамента  $b \geq 10$  м и модуль деформации грунтов основания  $E \geq 10$  МПа (в пределах сжимаемой толщи  $H_c$ ).

Толщина слоя  $H$ , в случае «а», принимается до кровли малосжимаемого грунта, а в случае «б», вычисляется согласно [1], прил.2, п.8.

Расчетной схемой основания, согласно [2], является линейно-деформируемое полупространство.

Расчет осадки основания проводится, согласно [1], прил.2, п.1 или [2], 5.5.31, методом послойного суммирования. Крен фундамента определяется по формуле (10) [1], прил.2 или по формуле (5.22) [2]. При этом средние, в пределах сжимаемой толщи  $H_c$ , значения модуля деформации  $\bar{E}$  и коэффициента Пуассона  $\bar{\nu}$  определяются по формулам (11) и (12) [1], прил.2 или по формулам (5.23) и (5.24) [2].

Нижняя граница сжимаемой толщи принимается на глубине  $H_c$ , для которой выполняется условие  $\sigma_{zp} = k\sigma_{zg}$ , где  $\sigma_{zp}$  – напряжение от нагрузки при расчете по [2] или дополнительное напряжение при расчете по [1],  $\sigma_{zg}$  – напряжение от собственного веса грунта. Согласно [2], значение  $k$  принимается в зависимости от ширины  $b$  подошвы фундамента в пределах от 0.2 до 0.5. Согласно [1], значение  $k$  принимается независимо от ширины  $b$  равным 0.2. Если найденная нижняя граница лежит в слое грунта с модулем деформации  $E < 5$  МПа, то значение  $H_c$  принимается равным минимальному из значений, соответствующих подошве этого слоя или глубине, где выполняется условие  $\sigma_{zp} = 0.1\sigma_{zg}$ . В программе предусмотрена возможность задания значения  $k$ , которая может быть использована для включения в сжимаемую толщу слоя с модулем деформации  $E < 5$  МПа в том случае, когда этот слой находится ниже найденной границы  $z = H_c$ .

В программе предусмотрена возможность определения нижней границы сжимаемой толщи по условию равенства напряжения от нагрузки заданному значению. Эта возможность может использоваться при определении осадки свайного фундамента как условного фундамента на естественном основании. В этом случае, согласно [4], нижняя граница сжимаемой толщи принимается на глубине, на которой дополнительное напряжение  $\sigma_{zp}$  равно 10 кПа.

Наряду с нормативным расчетом, который проводится в предположении линейного распределения давления на грунт, предусмотрен альтернативный расчет в предположении линейного распределения перемещений точек подошвы. Это предположение справедливо для абсолютно жесткого фундамента.

Задача заключается в отыскании такого распределения давления, при котором перемещения точек подошвы описываются функцией:

$$w(x, y) = ax + by + c$$

Область подошвы разбивается на малые прямоугольные элементы, в пределах которых давление  $p_i$  принимается постоянным. Решение строится при помощи следующего итерационного процесса. На первом шаге давление  $p_i$  принимается равным среднему давлению по [2] или дополнительному давлению (при  $b < 10$  м) по [1]. На следующем шаге, по давлениям  $p_i$ , методом послойного суммирования с учетом вкладов всех элементов, вычисляются перемещения  $s_i$  точек подошвы. При этом напряжения в грунте вычисляются при помощи формул (5.3), (5.4) из [5]. Затем вычисляются значения коэффициента отпора  $k_i = p_i / s_i$ . Для полученного распределения  $k_i$  и для заданной нагрузки  $N, M_x, M_y$  вычисляются параметры  $a, b, c$ . По перемещению  $w_i = ax_i + by_i + c$  и коэффициенту  $k_i$  определяются новые значения  $p_i = k_i w_i$ . Итерация оканчивается тогда, когда относительные приращения параметров  $a, b, c$  становятся меньше 0.5%. Распределение давления на грунт имеет нелинейный характер (рис.3).

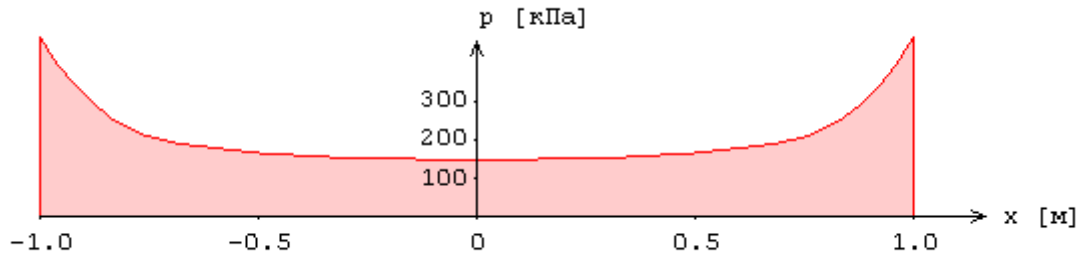


Рис.3. Пример распределения давления под подошвой абсолютно жесткого фундамента

При альтернативном расчете, средняя осадка (параметр  $c$ ), как правило, получается меньше, чем при нормативном расчете. Однако крены (параметры  $a, b$ ) могут быть больше, чем при нормативном расчете. Альтернативный расчет позволяет корректно учесть наличие зоны отрыва фундамента от основания при большой моментной нагрузке (рис.4).

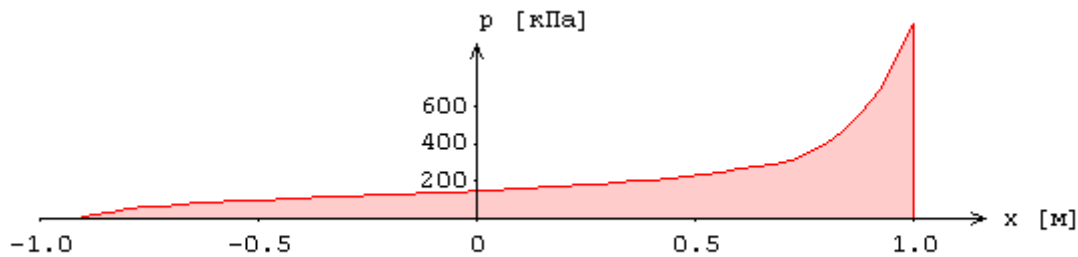


Рис.4. Пример распределения давления под подошвой абсолютно жесткого фундамента при наличии зоны отрыва фундамента от основания

## 5. Расчет просадки

Расчет просадки грунта основания производится при условии замачивания просадочного грунта сверху до полного водонасыщения согласно [1], прил.2, пп.12-16 или [2], разд.6.1. Просадка вычисляется по формуле:

$$s_{sl} = \sum_i \varepsilon_{sl,i} h_i k_{sl,i}$$

где  $\varepsilon_{sl,i}$  - относительная просадочность  $i$ -го слоя грунта толщиной  $h_i$ . Коэффициент  $k_{sl,i}$  определяется следующим образом:

$$k_{sl,i} = 1 \text{ при } b \geq 12 \text{ м,}$$

$$k_{sl,i} = 0.5 + 1.5(p - p_{sl,i}) / p_0 \text{ при } b \leq 3 \text{ м}$$

Здесь  $p$  - среднее давление под подошвой фундамента,  $p_{sl,i}$  - начальное просадочное давление грунта  $i$ -го слоя,  $p_0 = 100$  кПа,  $b = \min(l_x, l_y)$  - расчетная ширина фундамента. Для промежуточных значений  $b$  применяется интерполяция. При расчете просадки от собственного веса грунта коэффициент  $k_{sl}$  определяется следующим образом:

$$k_{sl} = 1 \text{ при } H_{sl} \leq 15 \text{ м}$$

$$k_{sl} = 1.25 \text{ при } H_{sl} \geq 20 \text{ м}$$

Здесь  $H_{sl}$  - просадочная толща. Для промежуточных значений  $H_{sl}$  применяется интерполяция.



За начальное просадочное давление  $p_{sl}$  принимается давление, при котором относительная просадочность  $\varepsilon_{sl}$  равна 0.01.

Тип грунтовых условий по просадочности определяется в зависимости от величины просадки от собственного веса грунта. В грунтовых условиях I типа, просадка от собственного веса грунта отсутствует или не превышает 5см. В грунтовых условиях II типа, просадка от собственного веса грунта превышает 5см.

В грунтовых условиях II типа различают верхнюю зону просадки  $h_{sl,p}$  и нижнюю зону просадки  $h_{sl,g}$ , в которых просадка равна  $s_{sl,p}$  и  $s_{sl,g}$  соответственно. В грунтовых условиях I типа принимается  $h_{sl,g} = 0$  и  $s_{sl,g} = 0$ . Просадка грунта  $s_{sl}$  на уровне подошвы фундамента вычисляется на основе графиков относительной просадочности (рис.5).

## 6. Подбор размеров фундамента

При подборе размеров подошвы фундамента могут быть заданы минимальные размеры подошвы и шаг приращения размеров. Давление  $p$  на грунт основания определяется в предположении линейного распределения давления по подошве фундамента. При действии только вертикальной нагрузки, давление  $p$  постоянно, а при наличии моментной нагрузки, оно является переменным. Предусмотрен учет условия  $p_{\min} / p_{\max} \geq 0.25$ . Предусмотрен подбор размеров подошвы без учета требования безотрывной работы фундамента. Размер зоны отрыва ограничивается по условию  $e = M / N \leq l / 4$ . Пример распределения давления под краями фундамента, при действии моментов в двух плоскостях с образованием зоны отрыва, приведен на рис.6. Для подобранных размеров подошвы фундамента выводятся результаты всех необходимых проверок.

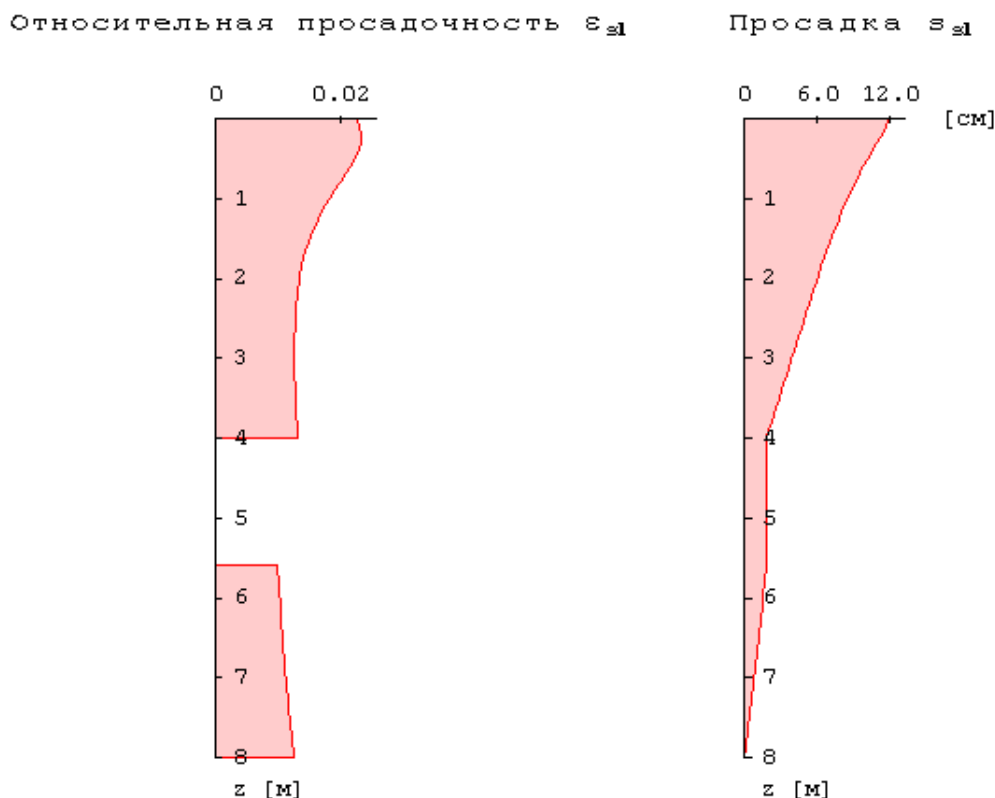


Рис.5. Пример распределения относительной просадочности по глубине

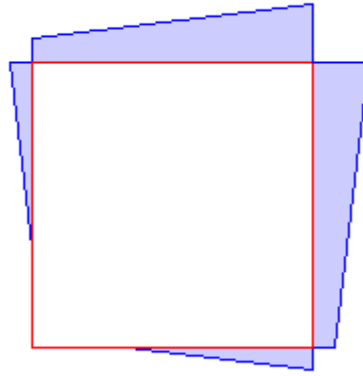
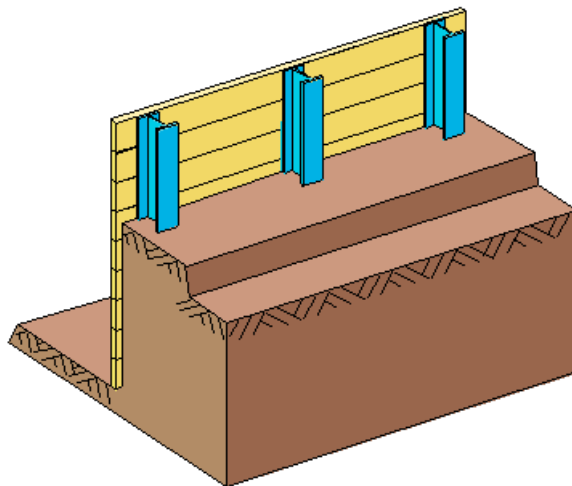


Рис.6. Пример распределения давления под краями фундамента

## Литература

1. СНиП 2.02.01-83\*. Основания зданий и сооружений / Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2002. – 48 с.
2. СП 50-101-2004. Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений. – М.: ФГУП ЦПП, 2005.
3. ГОСТ 23161-78: Грунты. Метод лабораторного определения характеристик просадочности.
4. Руководство по проектированию свайных фундаментов / НИИОСП Госстроя СССР. - М.: Стройиздат, 1980.
5. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений: Основания и фундаменты. – Стройиздат, 1964.

## 570 – Шпунтовая стенка

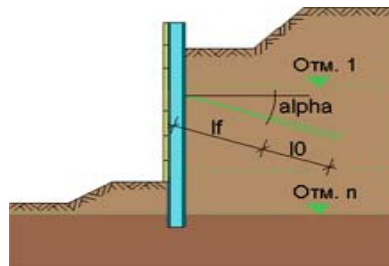


Программа предназначена для проектирования и расчёта шпунтовой стенки свободно защемленной или заделанной в грунте с возможностью установки анкеров.

В качестве нагрузок, кроме давления грунта, могут быть заданы различные нагрузки на поверхность грунта и на саму стенку. Рассчитывается глубина заделки стенки в грунте, а параметры анкеров могут быть заданы пользователем, либо рассчитаны программой. Стенка может быть как сплошной (железобетонной или набранной из шпунтовых профилей), так и с несущими элементами в виде свай (железобетонных или стальных). В железобетонных элементах рассчитывается требуемая арматура согласно СНиП 2.03.01-84\* “Бетонные и железобетонные конструкции” [1], либо по СП 52-101-03 “Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры” [2], либо по СНБ 5.03.01-02 “Бетонные и железобетонные конструкции” [3] и подбираются диаметр и шаг расположения прутков.

## 1. Расчетная схема

Программа рассчитывает и проектирует шпунтовую стенку с максимум 5 анкерами и условиями свободного опирания или полного защемления стенки в грунте. Рельеф поверхности грунта можно определить при помощи максимум 10 точек. Угол наклона поверхности грунта может варьироваться от  $-90^\circ$  до  $+90^\circ$ . Можно задать откос у основания стенки в котловане. Грунт может быть задан горизонтальными слоями (возможен учет до 10 слоев). Они могут располагаться произвольно по высоте. На высоте заданного уровня грунтовых вод производится автоматическое деление соответствующих слоев. Программа рассматривает систему до максимальной глубины, которая по умолчанию составляет глубину котлована, умноженную на 2.5. Пользователь может самостоятельно увеличить данную область. Слои, расположенные глубже, обрезаются, или нижняя граница последнего слоя удлиняется до данной предельной глубины.



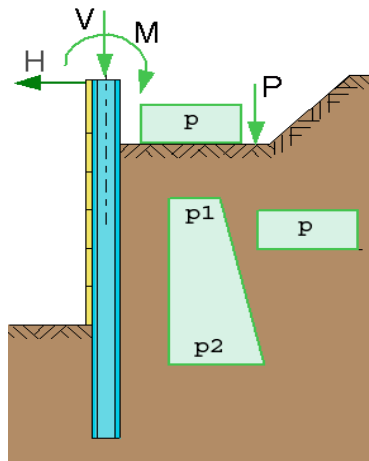
Система и входные данные имеют принципиально следующую ориентацию:

- слева от стенки расположен котлован,
- справа от стенки расположена поверхность примыкающей местности.

## 2. Нагружение

В качестве нагрузки задается расчетное сочетание усилий (PCY) на грунт и стенку. При этом можно задавать:

- блочные (равномерно распределенные на участке) нагрузки на поверхность справа от стенки;
- ленточные нагрузки на поверхность справа от стенки;
- сосредоточенные нагрузки (H, V, M), приложенные к верхней части стенки;
- нагрузки от фундамента (заглубленные блочные нагрузки);
- дополнительные произвольные распределенные нагрузки на стенку.



Давление грунта на стенку может быть задано как активное давление в предельном состоянии, или как давление покоя, либо промежуточное значение.

### 3. Расчет давления грунта

#### 3.1 Определение давления грунта по методу Кульмана

##### 3.1.1 Общие положения по использованию метода Кульмана

Расчет давления грунта происходит по так называемому расширенному методу Кульмана. Используется метод Кульмана с плоской поверхностью скольжения. Для многослойных грунтов, при использовании общей поверхности скольжения, для искомого определяющего давления грунта применяется приближенное решение, содержащее необходимую для практических целей точность обычных статических расчетов грунта. Необходимо учитывать границы применения метода с плоской поверхностью скольжения для расчета сопротивления грунта. Для шпунтовых стенок они составляют: при отрицательном угле трения о стенку  $-2/3 \cdot \varphi \leq \delta_p \leq 0$ ,  $\varphi \leq 35^\circ$  и  $\beta \leq 0^\circ$ , при положительном угле трения о стенку  $+\varphi \geq \delta_p \geq 0^\circ$  следует использовать исключительно  $\beta \geq 0^\circ$ .

При мягких связных слоях всегда следует устанавливать  $\delta_p = 0$ .

##### 3.1.2 Расчет давления грунта

Программа, варьируя угол поверхности скольжения, определяет для каждого слоя грунта общее давление грунта в центре области и на границах. Эти значения содержат части от собственного веса грунта (включая сцепление) и от внешних нагрузок. В выводе, помимо соответствующего угла наклона поверхности скольжения, эти части представлены отдельно. Для сопротивления грунта рассчитанные значения общего давления грунта уже делятся на соответствующий коэффициент безопасности.

При варьировании углов поверхности скольжения, исследуются все вынужденные поверхности скольжения, возникающие от углов рельефа местности и полосовых нагрузок (начальные и конечные точки нагрузок). Таким образом, мы получаем непрерывные частичные фрагменты линии давления грунта Кульмана, которые можно использовать далее. Данный подход позволяет надежно вычислить определяющее значение общего давления грунта. Таким образом, распределение общего давления грунта характеризуется в каждой области тремя значениями. Путем дифференцирования мы получаем эпюру давления грунта. Внутри каждой области слоя данная эпюра является линейной. Если необходимо получить более подробную эпюру давления грунта, то это можно сделать путем деления толщи на несколько слоев, имеющих идентичные характеристики грунта.

## 4. Расчет усилий в сечениях стенки

### 4.1 Методы расчета

В основе расчета усилий в сечениях лежат методы Якоби и Блюма. До воображаемой опоры в грунте на стенку действует результирующее давление грунта. В случае «полного защемления» стенки в грунте возникает опорная реакция грунта, эквивалентная сила  $S$ . Чтобы эта эквивалентная сила  $S$  возникла, стену следует продлить за пределы воображаемой опоры.

Для расчета усилий в сечениях используется метод начальных параметров. Величины внутренних силовых факторов выводятся на границах слоев, в точках крепления анкеров, в воображаемой опоре и на высоте прочих изменений эпюры давления грунта. Дополнительно выводятся максимальные значения.

### 4.2 Определение положения воображаемой опоры

Положение воображаемой опоры связано с определенными краевыми условиями в ней: «полное защемление» или «свободное опирание». Теоретически требуемая длина стенки определяется так, чтобы выполнялось принятое условие опирания. В некоторых случаях для этого требуются итерации, выполняемые программой.

### 4.3 Определение дополнительной глубины заделки

Полученная в результате расчета реакция воображаемой опоры  $S$  представляет собой в действительности силу, распределенную по поверхности стенки. Чтобы она возникла, стенку следует продлить за пределы воображаемой опоры, то есть имеющееся в области защемления сопротивление грунта должно иметь величину силы  $S$ . Программа определяет сопротивление грунта справа от стены по методу Кульмана. Из распределения и величины сопротивления грунта, использованного с коэффициентом безопасности, и полученной из расчета усилий в сечениях величины силы  $S$  рассчитывается дополнительная глубина заделки. Данный подход соответствует формуле Лакнера.

### 4.4 Вычисление требуемой длины профиля

Для каждого типа опирания определяется и выводится требуемая длина профиля. При этом отдельные части распределяются следующим образом:

$$\text{треб. } L = H + u + x + dx$$

где:	$H$ :	верхняя часть стены до котлована
	$u$ :	от дна котлована до нулевой точки нагрузки
	$x$ :	от нулевой точки нагрузки до воображаемой опоры
	$dx$ :	дополнительная глубина заделки

## 5. Проектирование несущих элементов стенки

### 5.1 Несущие элементы стенки из стали

В качестве стальных несущих элементов стенки могут быть выбраны либо стальные сваи, расположенные на некотором расстоянии друг от друга, либо стенка может быть выполнена из сцепленных между собой специальных шпунтовых профилей. В первом случае, для свай могут быть использованы двутавры по ГОСТ 8239-89, ГОСТ 26020-83, СТО АСЧМ 20-93 или трубы по ГОСТ 8732-78\*, ГОСТ 10704-91. Могут также быть выбраны профили других типов и марок из поставляемой базы профилей, либо характеристики профиля могут быть заданы в программе отдельно. В качестве шпунтовых профилей в программе предусмотрены профили ШП-1, ШК-1 - ГОСТ 4781-85 и шпунты Ларсена Л-4, Л-5, Л-7, Л-5У - ТУ 14-102-147-93.

Проверка прочности производится на достижение нормальными, касательными или эквивалентными напряжениями соответствующего расчетного сопротивления по пределу текучести.

### 5.2 Несущие элементы стенки из железобетона

В качестве железобетонных несущих элементов могут быть выбраны прямоугольные или квадратные сваи, либо сплошная стенка. Для железобетонных элементов производится расчет арматуры с учетом требований трещиностойкости по СНиП 2.03.01-84\*, СНиП 52-01-03 или СНБ 5.03.01-02. Для рассчитанной арматуры выполняется подбор диаметра и шага расположения прутков.

## 6. Дополнительные расчеты и проверки

Дополнительно проводится расчет длины анкерной тяги, если она не задана, и проверка устойчивости заанкеренной части грунта на глубинный сдвиг при поступательном движении грунта и стенки. Кроме того, проводится проверка устойчивости стенки и массива грунта на сдвиг по круглоцилиндрической поверхности скольжения.

## 7. Пояснительные чертежи

Для наглядного изображения исходных данных и результатов расчета, программа выводит четыре пояснительных чертежа.

Предусмотрена возможность отключения одного или всех чертежей.

### 7.1 Чертеж расчетной схемы

Изображается заданная поверхность грунта, подошва котлована с откосом (если имеется), все необходимые для расчета слои грунта, уровень грунтовых вод, а также положение и наклон анкеров.

### 7.2 Чертеж нагрузок

Изображаются заданные нагрузки.



### 7.3 Чертеж давления грунта

Изображаются пассивная и активная составляющие давления грунта. На чертеже видны и отдельные части давления грунта ( $e_{agh}$ ,  $e_{arh}$ ,  $e_{awh}$  и  $e_{rgh}$ ), из которых состоит результирующее давление.

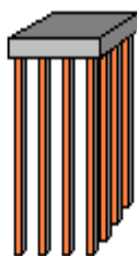
### 7.4 Чертеж усилий в сечении

Для каждого типа заделки стенки в грунте изображается прогиб  $w$ , эпюры моментов и поперечных сил.

### Литература

1. СНиП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции/Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 80 с.
2. СП 52-101-03. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры / Госстрой России. – М., 2003.
3. СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2003. – 139 с.
11. Изменение №1 СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции / Минстройархитектуры Республики Беларусь. – Минск: 2004. – 22 с.

## 580 – Ростверк под колонну



Программа предназначена для проектирования ростверка свайного фундамента под колонну согласно СП 50-102-2003 [1] и СП 52-101-2003 [2] с учетом указаний Пособия [3]. Нагрузки могут задаваться и комбинироваться согласно СНиП 2.01.07-85\* [4] или СП 20.13330.2011 [5]. Производится конструирование продольной арматуры. Определяется погонная площадь поперечной арматуры, требуемая по расчету на действие поперечной силы. Производится конструирование косвенной арматуры в зоне смятия ростверка колонной. Проводятся следующие расчеты: 1) проверка прочности нормальных сечений ростверка, 2) проверка прочности наклонных сечений ростверка, 3) проверка прочности ростверка на смятие колонной, 4) проверка прочности ростверка на продавливание колонной, 5) проверка прочности ростверка на продавливание угловой сваей, 6) расчет по образованию и раскрытию нормальных трещин в ростверке. Предусмотрен учет сейсмических воздействий.

## 1. Расчетная схема

Рассматривается свайный фундамент под колонну прямоугольного сечения с размерами  $c_x, c_y$ , расположенную в центре ростверка прямоугольной формы в плане с размерами  $l_x, l_y$  (рис.1). Применяется система координат  $x, y$  с началом координат в левом нижнем углу плана ростверка. Оси координат совмещаются со сторонами плана ростверка.

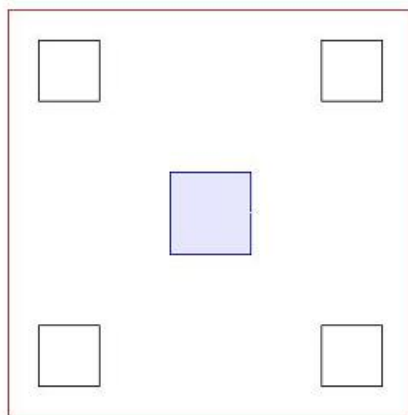


Рис.1. Ростверк

Рассматриваются сваи квадратного или круглого сечения с размером  $d$ . Задается рядовое размещение свай, которое характеризуется числом  $n_x$  свай в ряду вдоль оси  $x$  и числом  $n_y$  свай в ряду вдоль оси  $y$ . Если принятое размещение свай отличается от рядового, то сначала задаются полные ряды свай путем ввода  $n_x$  и  $n_y$ , а затем задаются неполные ряды путем ввода координат концов отрезков, на которых размещаются сваи. Предполагается, что сваи размещаются симметрично относительно осей колонны.

## 2. Нагрузки

Нагрузки на фундамент состоят из вертикальной силы  $N$ , горизонтальных сил  $H_x, H_y$  и моментов  $M_x, M_y$ , передаваемых на фундамент от колонны. Вертикальная сила положительна, если она действует сверху вниз. Горизонтальная сила положительна, если она действует в положительном направлении соответствующей координатной оси. Положительные направления моментов совпадают с направлениями моментов горизонтальных сил

относительно осей координат в плоскости подошвы ростверка. Моменты  $M_x, M_y$  задаются относительно осей сечения колонны.

Вертикальные нагрузки на сваи определяются согласно [1], 7.1.12. При этом учитываются моменты горизонтальных сил относительно осей координат, лежащих в плоскости подошвы ростверка.

Классификация и комбинирование нагрузок принимаются согласно СНиП [4] или СП [5]. Нагрузки подразделяются на постоянные, длительные, кратковременные, особые и сейсмические. Комбинирование нагрузок представляет собой генерацию множества возможных комбинаций нагрузок с учетом коэффициентов надежности по нагрузке  $\gamma_f$  и коэффициентов, связанных с одновременным учетом двух и более временных нагрузок. При наличии особых и/или сейсмических нагрузок, наряду с основными комбинациями, генерируются также особые комбинации.

Возможен ввод несочетаемых нагрузок. Такие нагрузки включаются в группу несочетаемых нагрузок. В комбинацию может войти только одна нагрузка из каждой группы. Нумерация групп начинается с единицы. Группы могут применяться, в частности, при учете ветровых нагрузок (при рассмотрении действия ветра по различным направлениям).

Возможен ввод знакопеременных нагрузок. В этом случае, в расчете учитывается как заданная нагрузка, так и нагрузка противоположного знака. Сейсмические нагрузки автоматически рассматриваются как знакопеременные нагрузки.

При задании сейсмического воздействия, вводятся нагрузки на фундамент, соответствующие формам колебаний. По заданным нагрузкам на фундамент определяются нагрузки на сваи  $N_i$ , соответствующие формам колебаний. Расчетное значение нагрузки на сваю вычисляется

согласно [6], по формуле  $N_p = \sqrt{\sum_{i=1}^n N_i^2}$ . Знак  $N_p$  принимается одинаковым со знаком  $N_{i,\max} = \max N_i$ .

Проверки по первой группе предельных состояний проводятся для расчетных ( $\gamma_f > 1$ ) основных и особых комбинаций нагрузок, а проверки по второй группе – для нормативных ( $\gamma_f = 1$ ) основных комбинаций.

Предусмотрен учет собственного веса ростверка в комбинации нагрузок. При этом в расчетных комбинациях собственный вес ростверка принимается с заданным коэффициентом надежности.

### 3. Расчет ростверка по прочности нормальных и наклонных сечений

Расчет по прочности нормальных сечений проводится на основе нелинейной деформационной модели согласно [2], 6.2.21. На первом этапе расчета, по прочности нормальных сечений определяются требуемые площади продольной арматуры в направлениях  $x$  и  $y$ . В качестве расчетных сечений ростверка рассматриваются сечения в плоскостях граней колонны. Расчетные изгибающие моменты определяются по реакциям свай, расположенных по одну сторону от расчетных сечений. На втором этапе, производится конструирование продольной арматуры по заданным минимальным и максимальным значениям диаметра стержней и шага стержней с учетом заданной минимальной толщины защитного слоя бетона. Пример подбора продольной арматуры приведен на рис.2. На третьем этапе, вычисляются предельные значения изгибающих моментов  $M_u = \gamma_u M$  для подобранной продольной арматуры.

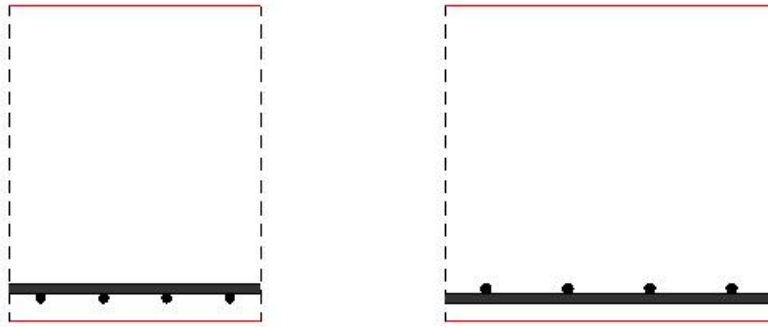


Рис.2. Пример подбора продольной арматуры

Расчет по прочности наклонных сечений проводится согласно [2], 6.2.32 - 6.2.34. Предусмотрен вывод эпюр расчетных поперечных сил  $Q_x$  и  $Q_y$  по осям  $x$  и  $y$ . Для полученных распределений поперечных сил отыскиваются наиболее опасные наклонные сечения, и проверяется прочность ростверка без поперечной арматуры. Если прочность ростверка не обеспечена, то определяется требуемая погонная площадь поперечной арматуры.

#### 4. Расчет ростверка на смятие колонной

Расчет ростверка на смятие колонной проводится согласно [2], 6.2.43 – 6.2.45. Условие прочности элемента без косвенной арматуры имеет вид:

$$\frac{N}{N_b} \leq 1$$

Здесь  $N_b = \psi R_{b,loc} c_x c_y$  - предельное значение сжимающей силы при отсутствии косвенной арматуры,  $R_{b,loc} = \varphi_b R_b$ ,  $\varphi_b = 0.8 \sqrt{A_{b,max} / c_x c_y} \leq 2.5$ ,  $\varphi_b \geq 1$ ,  $R_b$  - расчетное сопротивление бетона при сжатии (с учетом коэффициента условий работы  $\gamma_b$ ),  $A_{b,max} = (c_x + 2c_y)(c_y + 2c_x)$  - расчетная площадь смятия.

Если прочность ростверка не обеспечена, то подбирается косвенная арматура. Условие прочности ростверка с косвенной арматурой имеет вид:

$$\frac{N}{N_{bs}} \leq 1$$

Здесь  $N_{bs} = N_b + N_s$  - предельное значение сжимающей силы при наличии косвенной арматуры,  $N_s = 2\psi \varphi_{s,xy} R_{s,xy} \mu_{s,xy} A_{b,loc}$ ,  $R_{s,xy}$  - расчетное сопротивление арматуры сеток,  $\varphi_{s,xy} = \sqrt{A_{b,loc,ef} / A_{b,loc}}$ ,  $\mu_{s,xy} = (n_x l_x + n_y l_y) A_s / l_x l_y s$  - коэффициент косвенного армирования;  $l_x, l_y$  - длины стержней, параллельных направлениям  $x, y$ ;  $n_x, n_y$  - числа стержней,  $A_s$  - площадь сечения одного стержня,  $s$  - шаг сеток косвенной арматуры, располагаемых по высоте ростверка.

При проверке условия прочности, учитывается ограничение  $N_{bs} \leq 2N_b$ . При  $N > 2N_b$ , прочность элемента невозможно обеспечить при помощи косвенного армирования.

## 5. Расчет ростверка на продавливание

Расчет ростверка на продавливание состоит из расчета на продавливание колонной и расчета на продавливание угловой сваей. Расчеты на продавливание проводятся согласно [2], 6.2.46, 6.2.47, 6.2.49.

При определении расчетного контура, в расчете на продавливание ростверка колонной, учитываются указания [3], относящиеся к построению основания пирамиды продавливания. Боковые грани пирамиды продавливания ограничиваются гранями свай, ближайших к колонне. Отношение рабочей высоты ростверка  $h_0$  к расстоянию  $d$  от колонны до стороны основания пирамиды продавливания ограничивается условиями  $1 \leq h_0/d \leq 2.5$ . В общем случае, расстояния  $d_x, d_y$  от колонны до сторон основания пирамиды продавливания вдоль осей  $x, y$  являются различными. В качестве расчетного контура принимается прямоугольный контур, стороны которого удалены от колонны на расстояния  $d_x/2$  и  $d_y/2$ . Пример расчетного контура приведен на рис.3, на котором контур основания пирамиды продавливания изображен штриховой линией.

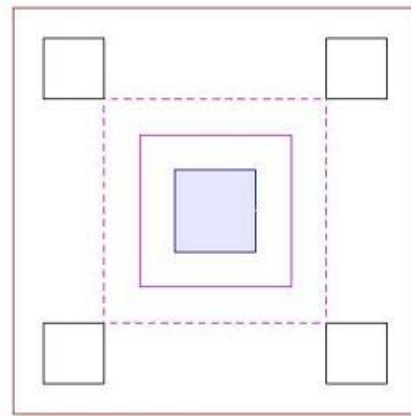


Рис.3. Пример расчетного контура при продавливании колонной

Дополнительно рассматриваются пирамиды продавливания, стороны основания которых удалены от колонны вдоль осей  $x, y$  соответственно на расстояния  $h_0$  и  $d_y, d_x$  и  $h_0$ , а также на расстояние  $h_0$  вдоль обеих осей. В выходном документе программы выводятся результаты расчета для той пирамиды продавливания, для которой условие прочности принимает наибольшее значение.

В расчете на продавливание ростверка угловой сваей, пирамида продавливания также принимается согласно указаниям [3]. Пример расчетного контура при продавливании угловой сваей приведен на рис.4.

При расчете на продавливание, сваи круглого сечения заменяются сваями с равновеликим квадратным сечением.

Согласно [2], (6.105), условие прочности ростверка без арматуры в зоне продавливания имеет вид:

$$\frac{F}{F_{b,ult}} + \frac{M_x}{M_{bX,ult}} + \frac{M_y}{M_{bY,ult}} \leq 1$$

Здесь  $F$  - продавливающая сила;  $F_{b,ult} = R_{bt} \cdot u \cdot h_0$  - предельная сила;  $X, Y$  - центральные оси расчетного контура;  $M_x, M_y$  - моменты относительно осей  $X, Y$ ;  $M_{bX,ult} = R_{bt} \cdot W_x \cdot h_0$  и  $M_{bY,ult} = R_{bt} \cdot W_y \cdot h_0$  - предельные моменты;  $R_{bt}$  - расчетное сопротивление бетона при

растяжении (с учетом коэффициента условий работы бетона  $\gamma_b$ ). Расчетный периметр  $u$  определяется как сумма длин сторон расчетного контура, умноженных на отношение  $h_0/d$ . При этом длины сторон, параллельных оси  $y$ , умножаются на  $h_0/d_x$ , а длины сторон, параллельных оси  $x$ , умножаются на  $h_0/d_y$ . Моменты сопротивления  $W_x, W_y$  расчетного контура также определяются с учетом отношений  $h_0/d$ . Продавливающая нагрузка  $F, M_x, M_y$  определяется по реакциям свай, расположенных вне основания пирамиды продавливания.

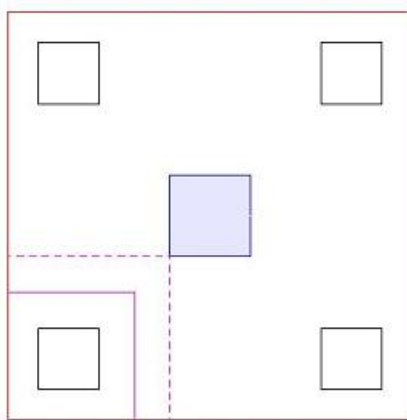


Рис.4. Пример расчетного контура при продавливании угловой свай

## 6. Расчет ростверка по трещиностойкости

Расчет по образованию и раскрытию нормальных трещин проводится согласно [2], 7.2.1 – 7.2.4, 7.2.11, 7.2.12. Изгибающие моменты  $M_{crc}$  при образовании трещин определяются по предельному состоянию растянутого бетона при помощи расчета на основе нелинейной деформационной модели. При вычислении момента  $M_{crc}$ , а также при вычислении напряжений  $\sigma_s, \sigma_{s,crc}$  в растянутой арматуре после образования трещин, входящих в формулы (7.13) и (7.22), применяются диаграммы состояния бетона и арматурной стали. Площадь сечения растянутого бетона  $A_{bt}$  и площадь сечения растянутой арматуры  $A_s$ , через которые по формуле (7.21) вычисляется базовое расстояние  $l_s$  между трещинами, определяются непосредственно перед образованием трещин. Значение  $A_{bt}$  определяется при следующих ограничениях на высоту растянутой зоны:  $h_t \geq 2a$ ,  $h_t \leq h/2$ , где  $a$  – расстояние от растянутой арматуры до ближайшей грани сечения.



## Литература

1. СП 50-102-2003. Проектирование и устройство свайных фундаментов / Госстрой России. – М.: ФГУП ЦПП, 2004. – 82 с.
2. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры / ГУП «НИИЖБ», ФГУП ЦПП. – М., 2004.
3. Пособие по проектированию железобетонных ростверков свайных фундаментов под колонны зданий и сооружений / ЦНИИпромзданий Госстроя СССР и НИИЖБ Госстроя СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985.
4. СНиП 2.01.07-85\*. Нагрузки и воздействия / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1987. – 36 с..
5. СП 20.13330.2011: Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\*. – Минрегион России, 2010.
6. СНиП II-7-81\*. Строительство в сейсмических районах / Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2000. – 44 с.

## 785 – Проверка устойчивости стенки балки

Программа предназначена для проверки устойчивости стенки балки согласно СНиП II-23-81\* [1] или СП 53-102-2004 [2]. Рассматривается произвольное распределение нормальных напряжений по высоте стенки, которое возникает при расчете несимметричного сечения или при учете действия продольной растягивающей или сжимающей силы.

## 1. Расчетная схема

Расчетная схема представляет собой прямоугольную пластину толщиной  $t$ , соответствующую отсеку стенки балки, который ограничен поперечными ребрами жесткости. Длина пластины  $a$  равна расстоянию между ребрами жесткости, ширина пластины равна рабочей высоте стенки  $h_{ef}$ . Учитывается упругое защемление стенки в поясах. На вертикальных границах отсека принимаются условия шарнирного опирания.

В общем случае в пластине действуют нормальное напряжение  $\sigma_x$ , направленное по оси балки, касательное напряжение  $\tau$  и напряжение  $\sigma_y$ , вызванное действием локальной сжимающей нагрузки, приложенной к одному из поясов балки. Напряжения  $\sigma_x$  и  $\tau$  определяются согласно [1], п.7.2\* или [2], п.9.5.2 по формулам:

$$\sigma_x = \frac{M}{I} y$$

$$\tau = \frac{Q}{th}$$

где  $M, Q$  - расчетные значения изгибающего момента и поперечной силы, средние в пределах отсека балки,  $I$  - момент инерции сечения,  $y$  - расстояние от нейтральной оси до расчетной границы стенки,  $h$  - полная высота стенки. Сжимающее нормальное напряжение принимается положительным. Распределение по высоте стенки напряжения  $\sigma_x$  определяется путем задания наибольшего сжимающего  $\sigma_{x,сжим}$  и наибольшего растягивающего  $\sigma_{x,раст}$  напряжений, вычисленных у расчетных границ стенки. Растягивающее напряжение задается отрицательным значением. Напряжение  $\sigma_y$  от локальной расчетной нагрузки  $F$  определяется согласно [1], п.5.13 или [2], п.9.2.2 по формуле:

$$\sigma_y = \sigma_{loc} = \frac{F}{tl_{ef}}$$

где  $l_{ef}$  - длина распределения локальной нагрузки.

## 2. Расчет по СНиП II-23-81\*

При изгибе балки симметричного сечения без учета продольной силы, наибольшее растягивающее напряжение следует задать численно равным наибольшему сжимающему напряжению, т.е.  $\sigma_{x,раст} = -\sigma_{x,сжим}$ . В этом случае, согласно [1], пп.7.4\*, 7.6\*, проверка устойчивости проводится по формулам (74) и (79), имеющим следующий вид:

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma}{\sigma_{cr}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}}\right)^2} \leq \gamma_c$$

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma}{\sigma_{cr}} + \frac{\sigma_{loc}}{\sigma_{loc,cr}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}}\right)^2} \leq \gamma_c$$

Здесь  $\sigma_{cr}$  и  $\sigma_{loc,cr}$  - критические нормальные напряжения,  $\tau_{cr}$  - критическое касательное напряжение,  $\sigma = \sigma_{x,сжим}$ ,  $\gamma_c$  - коэффициент условий работы, который принимается согласно таблице 6\* из [1]. Приведенные формулы применимы при условной гибкости стенки  $\bar{\lambda}_w \leq 6$ . Первая из приведенных формул применяется, если нет локальной нагрузки или если локальная нагрузка приложена к растянутому поясу.

Критическое напряжение  $\tau_{cr}$  вычисляется по формуле:

$$\tau_{cr} = 10.3 \left( 1 + \frac{0.76}{\mu^2} \right) \frac{R_s}{\bar{\lambda}_{ef}^2}$$

Критическое напряжение  $\sigma_{cr}$  при  $\sigma_{loc} = 0$  вычисляется по формуле:

$$\sigma_{cr} = \frac{c_{cr} R_y}{\bar{\lambda}_w^2}$$

Здесь  $\bar{\lambda}_w = \frac{h_{ef}}{t} \sqrt{\frac{R_y}{E}}$ ,  $\bar{\lambda}_{ef} = \frac{d}{t} \sqrt{\frac{R_y}{E}}$ ,  $d = \min(a, h_{ef})$ ,  $\mu$  - отношение большей стороны пластины к меньшей,  $R_y, R_s$  - расчетные сопротивления стали,  $E$  - модуль упругости стали.

Коэффициент  $c_{cr}$  определяется по таблице 21 из [1] в зависимости от коэффициента

$\delta = \beta \frac{b_f}{h_{ef}} \left( \frac{t_f}{t} \right)^3$ , учитывающего степень упругого защемления стенки в поясах балки. В формулу

для  $\delta$  подставляются ширина  $b_f$  и толщина  $t_f$  сжатого пояса. При непрерывном закреплении сжатого пояса принимается  $\delta = \infty$ , в противном случае, коэффициент  $\delta$  вычисляется при

$\beta = 0.8$ . При  $a \leq h_{ef}$  имеет место формула  $\bar{\lambda}_{ef} = \frac{a}{h_{ef}} \bar{\lambda}_w$ , а при  $a > h_{ef}$  -  $\bar{\lambda}_{ef} = \bar{\lambda}_w$ .

При  $\sigma_{loc} \neq 0$  и при условиях  $\frac{a}{h_{ef}} > 0.8$  и  $\frac{\sigma_{loc}}{\sigma} > \left( \frac{\sigma_{loc}}{\sigma} \right)_{lim}$  коэффициент  $c_{cr}$  в приведенной

формуле для критического напряжения  $\sigma_{cr}$  заменяется на коэффициент  $c_2$ , который

принимается по таблице 25 из [1] в зависимости от  $a/h_{ef}$  и  $\delta$ . Предельное значение  $\left( \frac{\sigma_{loc}}{\sigma} \right)_{lim}$

принимается по таблице 24 из [1] в зависимости от  $a/h_{ef}$  и  $\delta$ .

Критическое напряжение  $\sigma_{loc,cr}$  определяется по формуле:

$$\sigma_{loc,cr} = \frac{c_1 R_y}{\bar{\lambda}_a^2}$$

Здесь  $\bar{\lambda}_a = \frac{a}{t} \sqrt{\frac{R_y}{E}}$ ,  $c_1$  - коэффициент, который принимается по таблице 23 из [1] в зависимости

от  $a/h_{ef}$  и  $\delta$ . Следует отметить, что при действии локальной нагрузки на растянутый пояс в формулу для коэффициента  $\delta$  подставляются размеры растянутого пояса.

При условиях  $\frac{a}{h_{ef}} > 0.8$  и  $\frac{\sigma_{loc}}{\sigma} > \left(\frac{\sigma_{loc}}{\sigma}\right)_{lim}$  критическое напряжение  $\sigma_{loc,cr}$  рассчитывается по действительным размерам отсека. Однако, при определении  $\bar{\lambda}_a$ , значение  $a$  должно быть не больше  $2h_{ef}$ . Если при  $\frac{a}{h_{ef}} > 0.8$  выполняется неравенство  $\frac{\sigma_{loc}}{\sigma} \leq \left(\frac{\sigma_{loc}}{\sigma}\right)_{lim}$ , то при вычислении  $\bar{\lambda}_a$  и определении  $c_1$  по таблице 23 значение  $a$  заменяется на  $0.5a$ .

Случай  $|\sigma_{x,раст}| > \sigma_{x,сжим}$  возникает при более развитом сжатом поясе или при учете действия растягивающей продольной силы. В этом случае, расчет проводится согласно [1], п.7.9, с учетом следующих изменений: а) при определении  $\sigma_{cr}$  значение  $h_{ef}$  заменяется на значение  $2h_c$ , где  $h_c$  - расстояние от нейтральной оси до расчетной (сжатой) границы стенки, б) при  $\frac{a}{h_{ef}} > 0.8$  проводятся обе проверки независимо от отношения  $\frac{\sigma_{loc}}{\sigma}$  (в выходном документе программы приводится результат решающей проверки).

Случай  $|\sigma_{x,раст}| < \sigma_{x,сжим}$  возникает при более развитом растянутом поясе или при учете действия сжимающей продольной силы. В этом случае, расчет возможен только при условии  $\sigma_{loc} = 0$ . Проверка проводится согласно [1], п.7.9, на основе формулы для предельного значения отношения  $\frac{h_{ef}}{t}$ , которое определяется по формуле (90), имеющей вид:

$$\left(\frac{h_{ef}}{t}\right)_u = 4.35 \sqrt{\frac{(2\alpha - 1)E}{\sigma(2 - \alpha + \sqrt{\alpha^2 + 4\beta^2})}}$$

Здесь  $\alpha = (\sigma_{x,сжим} - \sigma_{x,раст}) / \sigma_{x,сжим}$ ,  $\beta = 1.4(2\alpha - 1) \frac{\tau}{\sigma}$ . При этом  $1 \leq \alpha < 2$ . В программе условие проверки представляется в виде

$$\frac{\bar{\lambda}_{uw}}{\lambda_{uw}} \leq 1$$

где  $\bar{\lambda}_{uw} = \left(\frac{h_{ef}}{t}\right)_u \sqrt{\frac{R_y}{E}}$ .

Случай  $|\sigma_{x,раст}| < \sigma_{x,сжим}$  и  $\sigma_{loc} \neq 0$  в [1] не рассматривается. Поэтому проверка устойчивости в этом случае проводится по методике DIN 18800 [3], включающей проверки при действии напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и  $\tau$  по отдельности и при их совместном действии.

Если при вводе наибольшего растягивающего напряжения  $\sigma_{x,раст}$  задано положительное значение, то такое напряжение считается сжимающим, и проверка устойчивости проводится по методике DIN 18800 [3], так как в [1] отсутствует методика расчета для случая полностью сжатой стенки балки (при  $\alpha < 1$ ).

### 3. Расчет по СП 53-102-2004

Методика проверки [2] принципиально не отличается от методики [1]. Здесь приводятся только отличительные особенности расчета. В случае  $\sigma_{x,раст} = -\sigma_{x,сжим}$ , согласно [2], п.9.5.3, проверка устойчивости проводится по формуле (73), имеющей следующий вид:

$$\frac{1}{\gamma_c} \sqrt{\left(\frac{\sigma}{\sigma_{cr}} + \frac{\sigma_{loc}}{\sigma_{loc,cr}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}}\right)^2} \leq 1$$

Коэффициент условий работы  $\gamma_c$  принимается по таблице 1 из [2]. Критическое напряжение  $\sigma_{loc,cr}$  определяется по формуле:

$$\sigma_{loc,cr} = \frac{c_1 c_2 R_y}{\lambda_w^2}$$

Здесь  $c_1$  - коэффициент, который принимается по таблице 13 из [2] в зависимости от  $a/h_{ef}$  и  $\rho = 1.04 \frac{l_{ef}}{h_{ef}}$  ( $l_{ef}$  - длина распределения напряжения  $\sigma_{loc}$ ),  $c_2$  - коэффициент, который принимается по таблице 14 из [2] в зависимости от  $a/h_{ef}$  и  $\delta$ .

При  $\sigma_{loc} \neq 0$  и  $\frac{a}{h_{ef}} > 0.8$  проверку выполняют дважды. При первой проверке, критическое напряжение  $\sigma_{loc,cr}$  рассчитывается по коэффициентам  $c_1$  и  $c_2$ , при определении которых длина отсека  $a$  заменяются на значение  $a_1$ , равное  $0.5a$  при  $\frac{a}{h_{ef}} \leq 1.33$  и равное  $0.67h_{ef}$  при  $\frac{a}{h_{ef}} > 1.33$ . Вторая проверка проводится для фактического значения  $a$ . При этом коэффициент  $c_{cr}$  принимается по таблице 15 из [2]. В выходном документе программы приводится результат решающей проверки.

В случае  $|\sigma_{x,раст}| > \sigma_{x,сжим}$ , расчет согласно [2], п.9.5.6, проводится аналогично. При определении  $\sigma_{cr}$  значение  $h_{ef}$  заменяется на значение  $2h_c$ . Критическое напряжение  $\sigma_{loc}$  определяется по фактическим размерам отсека.

В случае  $|\sigma_{x,раст}| < \sigma_{x,сжим}$ , расчет возможен только при условии  $\sigma_{loc} = 0$ . Проверка проводится согласно [2], п.9.5.7, по формуле (78), имеющей вид:

$$\frac{0.5\sigma_{x,сжим}}{\sigma_{cr}\gamma_c} \left(2 - \alpha + \sqrt{\alpha^2 + 4\beta^2}\right) \leq 1$$

Здесь  $\alpha = (\sigma_{x,сжим} - \sigma_{x,раст}) / \sigma_{x,сжим}$ ,  $\beta = \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{x,сжим}} \frac{\tau}{\tau_{cr}}$ . При определении  $\sigma_{cr}$  коэффициент  $c_{cr}$  принимается по таблице 16 в зависимости от  $\alpha$ . При этом  $1 \leq \alpha < 2$ .

Случай  $|\sigma_{x,раст}| < \sigma_{x,сжим}$  и  $\sigma_{loc} \neq 0$  в [2] не рассматривается. Поэтому проверка устойчивости в этом случае проводится по методике DIN 18800 [3].

---

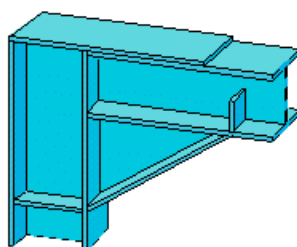
Если при вводе наибольшего растягивающего напряжения  $\sigma_{x,раст}$  задано положительное значение, то такое напряжение считается сжимающим, и проверка устойчивости проводится по методике DIN 18800 [3], так как в [2] отсутствует методика расчета для случая полностью сжатой стенки балки (при  $\alpha < 1$ ).

### Литература

1. СНиП II-23-81\*. Стальные конструкции/Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.
2. СП 53-102-2004. Общие правила проектирования стальных конструкций/Госстрой России. – М.: ФГУП ЦПП, 2005. – 132 с.
3. DIN 18800, Teil 3. Stahlbauten: Stabilitätsfalle, Plattenbeulen (11.90).



## 793 – Узел рамы



Программа предназначена для проектирования полностью сварного, жесткого на изгиб соединения ригеля и стойки согласно СНиП II-23-81\* “Стальные конструкции” [1]. Профили ригеля и стойки выбираются из сортамента горячекатанных двутавров по СТО АСЧМ 20-93 или по ГОСТ 26020-83. По результатам проектирования выводится чертеж соединения и спецификация.

## 1. Конструкция

Программа специализирована для проектирования Г-образных узлов рам с горизонтальным или наклонным ригелем (угол наклона  $0 \leq \alpha \leq 45^\circ$ ) и Т-образных узлов рам. Конструкция узла определяется следующими характеристиками: типом узла (Г-узел или Т-узел), расположением ригеля относительно стойки (ригель лежит на стойке или ригель пристыкован к стойке) и дополнительно для Г-узла одной из трех возможных форм исполнения. Предусмотрено задание одностороннего или двустороннего вута. Возможны две формы исполнения вута. Эти формы отличаются тем, что полка профиля с вутом доходит или нет до другого профиля. При помощи указанных характеристик могут задаваться различные конструкции узла (рис.1).

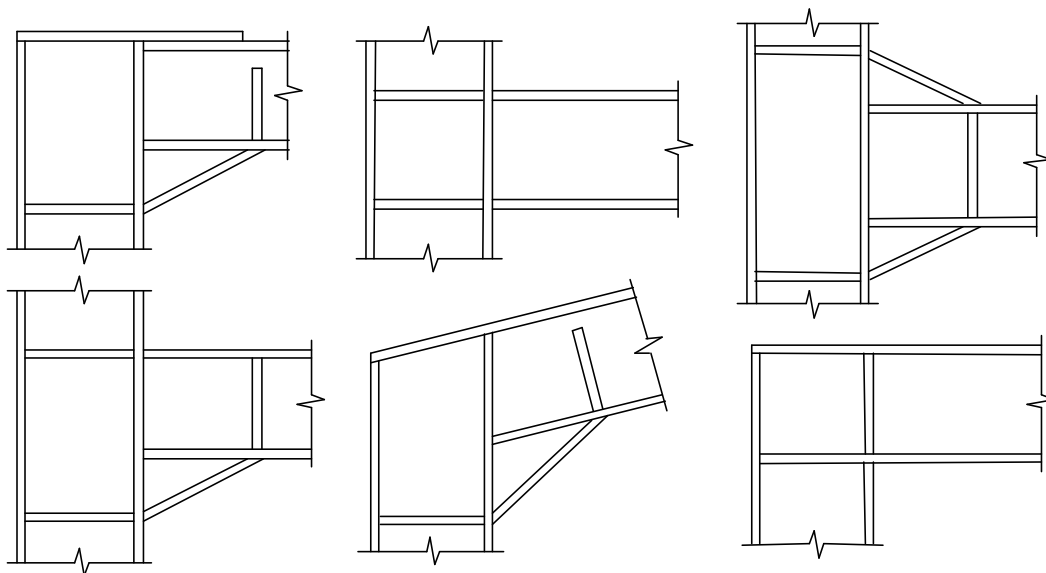


Рис. 1. Примеры конструкции узла

## 2. Нагружение

В качестве нагрузок на узел задаются расчетные значения усилий, определенные в идеальном узле расчетной схемы рамы, который совпадает с точкой пересечения  $K$  осей ригеля и стойки. Положительные направления продольной силы  $N$ , изгибающего момента  $M$  и поперечной силы  $Q$  показаны на рис.2. Индексы в обозначениях усилий имеют следующий смысл: р – ригель, с – стойка, в – сверху, н – снизу, л – слева, п – справа. Предусмотрен ввод вертикальной и горизонтальной узловых сил  $V$  и  $H$ , а также равномерно распределенных нагрузок  $q_p$  и  $q_c$  на ригель и стойку.

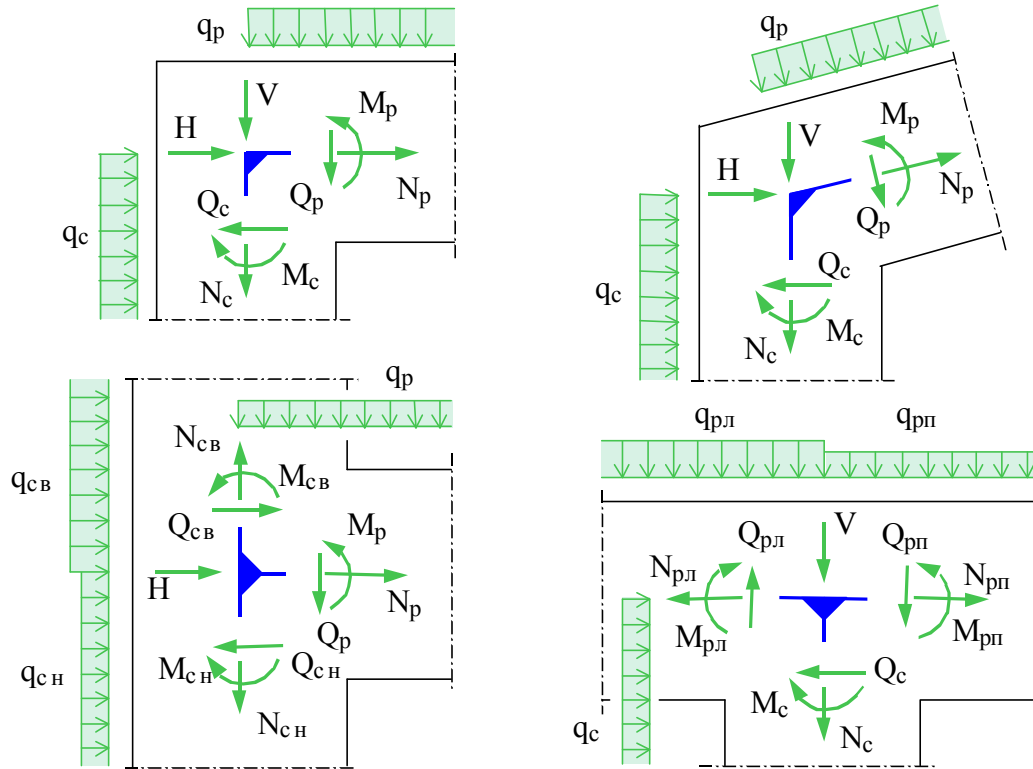


Рис. 2. Положительные направления нагрузок

Для контроля введенных нагрузок в программе предусмотрена проверка несущей способности сечений ригеля и стойки. Проверка проводится в следующих сечениях узла: в сечениях 1-1 и 2-2 на рис.3а, в сечениях 2-2 и 3-3 на рис.3б, 3с, 3д. Если проверка не выполняется, то выводится необходимая информация, и программа завершает работу. При наличии вута без продолжения полки, дополнительно проверяется несущая способность полки вута. Наибольшее напряжение в полке вута рассчитывается по формуле  $\sigma_{VF} = \sigma_F / \cos \alpha_V$ , где  $\sigma_F$  – наибольшее напряжение в полке профиля,  $\alpha_V$  – угол наклона полки вута.

### 3. Проектирование

Проектирование проводится согласно [1], пп. 11.2\*, 11.3\*, 11.5\*, 12.8. Возможно задание как нормированной стали, так и ненормированной, для которой требуется задать расчетное сопротивление по пределу текучести  $R_y$ , а также расчетные сопротивления угловых швов по металлу шва  $R_{wf}$  и по металлу границы сплавления  $R_{wz}$ . Сварные соединения с угловыми швами (см.п.11.2\*) рассчитываются с коэффициентами  $\beta_f = 0,7$ ;  $\beta_z = 1$ ;  $\gamma_{wf} = 1$ ;  $\gamma_{wz} = 1$ . Катеты угловых швов  $k_f$  принимаются не менее указанных в табл.38\* [1]. В качестве допускаемого напряжения в сварном шве и расчетной толщины сварного шва принимается  $R_{wf}\gamma_c$  и  $a = \beta_f k_f$ , если  $\beta_f R_{wf} < \beta_z R_{wz}$ , или  $R_{wz}\gamma_c$  и  $a = \beta_z k_f$ , если  $\beta_f R_{wf} > \beta_z R_{wz}$  (см. п.11-2\*). При проектировании деталей узла (ребра жесткости, несущей накладке, листа усиления стенки узла) применяется следующий ряд толщин: 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 30, 32, 36, 40 мм. Если при вводе задается минимальная толщина детали, то она добавляется в этот ряд. Если для заданной толщины не обеспечивается несущая способность детали, то подбирается одно из последующих значений указанного ряда толщин. При проектировании в надлежащих случаях применяется округление размеров до 5мм. В выходном документе программы принята следующая форма вывода результатов проверки:

$$\sigma/[\sigma] \leq 1$$

где  $\sigma$  - действующее напряжение,  $[\sigma]$  - допускаемое напряжение.

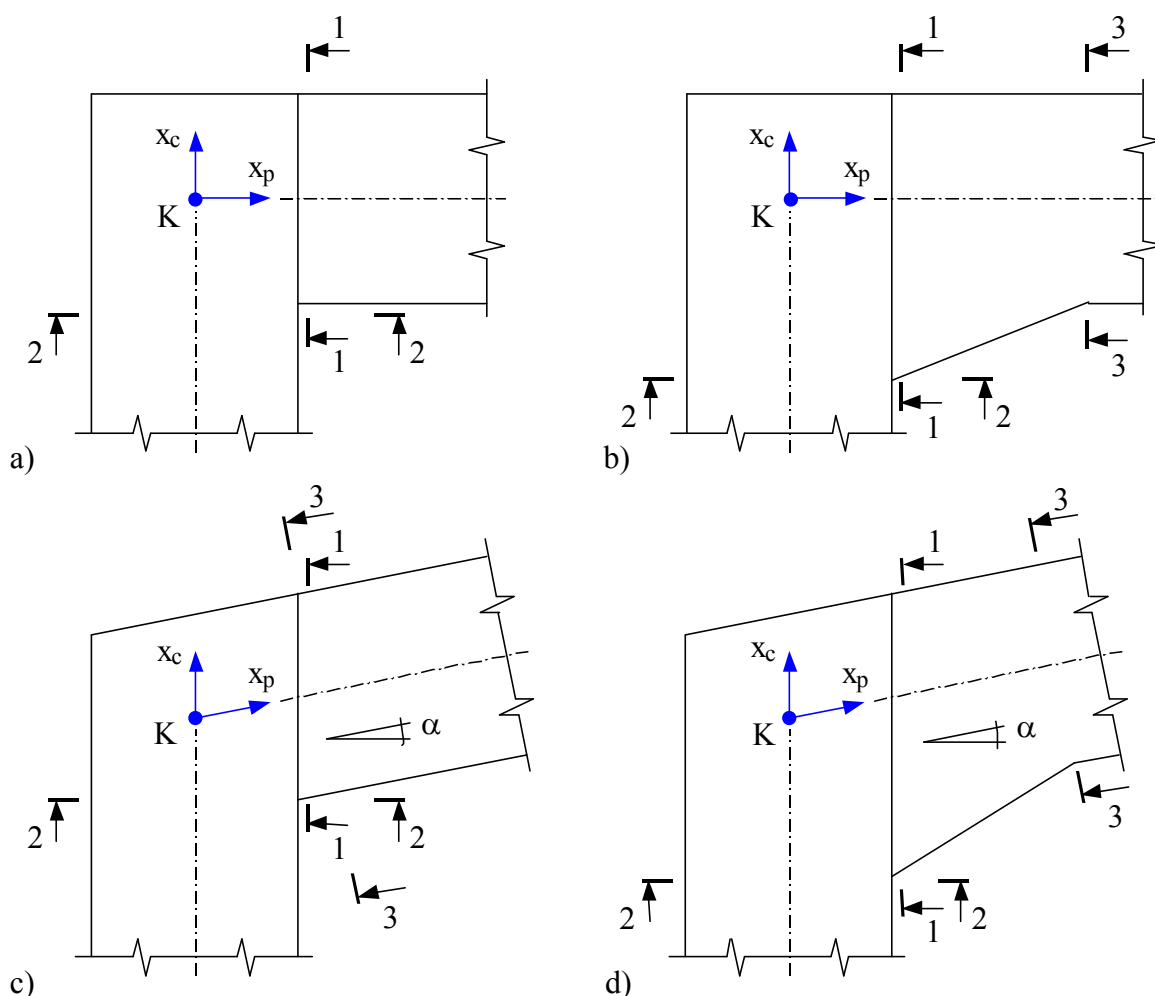


Рис. 3. Сечения узла

### 3.1 Проверка стенки узла

При проверке несущей способности стенки узла принимается, что изгибающие моменты и продольные силы воспринимаются только полками, а поперечные силы – только стенками. Проверка проводится с использованием стержневой модели узла, которая строится путем замены полок профилей и ребер жесткости стержнями с шарнирами на концах. Предполагается, что стенка узла (при отсутствии вута, стенка узла - это область стенки одного из профилей, заключенная между полками и ребрами) нагружена на каждом из краев касательными силами  $T_i$ , где  $i = в, н, л, п$ . Индексы *в, н, л, п* служат для указания краев: верхнего, нижнего, левого, правого. Внутренние силы и моменты в краевых сечениях узла (рис.3) вычисляются по значениям сил и моментов, заданных в центре  $K$ , и значению распределенной нагрузки следующим образом:

$$\begin{aligned}
 N &= N_K \\
 M &= M_K + Q_K x - qx^2 / 2 \\
 Q &= Q_K - qx
 \end{aligned}$$

Здесь  $x$  – координата соответствующего краевого сечения.

При проектировании узла с наклонным ригелем используются значения горизонтальной силы  $N_n$  и вертикальной силы  $Q_n$  в вертикальном сечении (сечение 1-1 на рис.3с, 3d), которые определяются по следующим формулам:

$$\begin{aligned}
 N_n &= N \cos \alpha + Q \sin \alpha \\
 Q_n &= Q \cos \alpha - N \sin \alpha
 \end{aligned}$$

Силы в полках или их нормальные компоненты (при наклонной полке) при одинаковых расстояниях от оси профиля до середин полок (сечения 1-1 и 2-2 на рис.3а, сечения 2-2 и 3-3 на рис.3б, сечения 1-1 и 2-2 на рис.3с, сечения 2-2 и 3-3 на рис.3д) определяются по следующим формулам:

$$\begin{aligned}
 N_Z &= N / 2 + |M| / h_F \\
 N_D &= N / 2 - |M| / h_F
 \end{aligned}$$

Здесь  $N_Z$ ,  $N_D$  - силы в растянутой и сжатой полках соответственно,  $h_F$  - расстояние между серединами полок. Для сечения 1-1 на рис.3с сила  $N$  заменяется на  $N_n$ . При неравных расстояниях от оси профиля до середин полок (сечение 1-1 на рис.3б, 3д) применяются следующие формулы:

$$\begin{aligned}
 N_Z &= (Nh_D + |M|) / h_F \\
 N_D &= (Nh_Z - |M|) / h_F
 \end{aligned}$$

Здесь  $h_Z, h_D$  - расстояния от оси профиля до середины растянутой и сжатой полки соответственно. Для сечения 1-1 на рис.3д сила  $N$  заменяется на  $N_n$ .

Для наклонной полки действующая в ней сила определяется как  $N_{zn} = N_Z / \cos \beta$  или  $N_{Dn} = N_D / \cos \beta$ , где  $\beta$  - угол наклона полки ( $\beta = \alpha$  или  $\beta = \alpha_V$ ).

Каждая из узловых сил  $V$  и  $H$  заменяется двумя силами, приложенными в соответствующих узлах стержневой модели. Сумма этих сил равна узловой силе, а сумма моментов этих сил относительно центра узла  $K$  равна нулю.

Из уравнений равновесия стержневой модели и стенки узла отыскиваются силы, действующие на концах стержней, и касательные силы  $T_i$ , действующие на краевых сторонах стенки узла.

Затем вычисляются удельные касательные силы  $t_i = T_i / l_i$ , где  $l_i$  - длина стороны,  $i = v, n, l, p$ .

При этом предполагается, что касательные напряжения равномерно распределены по сторонам стенки узла. Данное предположение оправдывается тем обстоятельством, что при достижении пластического состояния происходит выравнивание напряжений. По формуле  $\tau_{\max} = m a_i x(t_i / s)$ ,

где  $s$  - толщина стенки, определяются наибольшие касательные напряжения в стенке узла.

Варианты стержневой модели, отвечающие различным конструкциям узла, представлены на рис.4. При наличии вута, расчет касательных сил и соответствующих им напряжений проводится для двух частей стенки: узла  $A$  и  $B$ . В случае вута с продолжением полки, треугольная область, заключенная между полками профиля и вута, не учитывается, так как ее вклад незначителен.

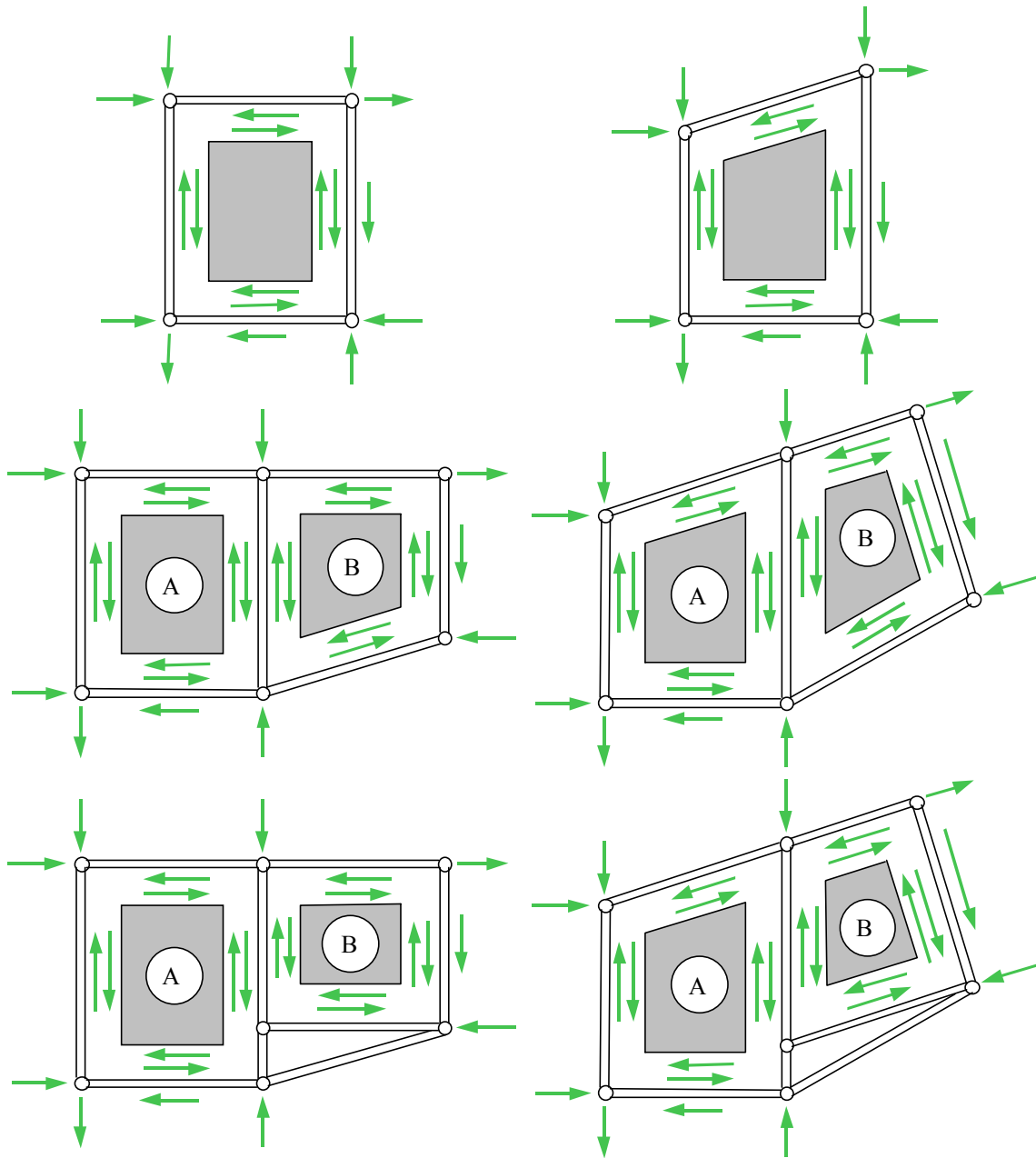


Рис. 4. Расчётные модели

Если прочность стенки узла не обеспечена, т.е. касательные напряжения превышают допускаемое значение, то выводится соответствующее сообщение. В этом случае, для конструкции без вута проектируется одностороннее или двустороннее усиление стенки узла в виде листа требуемой толщины, и определяются требуемые катеты сварных швов. Возможность образования сварных швов в области галтели профиля указывается при вводе положительным ответом на соответствующий вопрос. При отрицательном ответе, лист усиления подбирается с учетом условия, чтобы сварные швы находились вне области галтели. При расчете принимается, что касательные напряжения равномерно распределены по общей толщине стенки и листа усиления. Касательные напряжения в листе усиления и напряжения в сварном шве рассчитываются по формулам вида:

$$\tau = \frac{T}{l(s+t)}$$

$$\sigma_w = \frac{Tt}{la(s+t)}$$

Здесь  $t$  - толщина листа усиления,  $a$  - расчетная толщина сварного шва.

В программе, при выводе катетов сварных швов листа усиления стенки, применяются следующие обозначения:  $k_{fp}$  – катет шва соединения с полкой,  $k_{fc}$  – катет шва соединения со стенкой,  $k_{fv}$  – катет верхнего шва,  $k_{fl}$  – катет левого шва.

### 3.2 Проектирование ребер жесткости

Проектирование поперечных ребер жесткости осуществляется на основе расчета по несущей способности. В программе проектируются парные ребра, устанавливаемые по обе стороны стенки профиля. Силы  $F$ , действующие на ребра, определяются из уравнений равновесия стержневой модели узла.

Возможны двустороннее и трехстороннее присоединения ребра. Если высота ребра  $h_R$  меньше расстояния между полками  $h_n = h - 2t$  ( $h$  - высота профиля,  $t$  - толщина полки), то ребро присоединяется по двум сторонам, иначе – по трем сторонам. Высота ребра может быть равной  $\frac{1}{4}h_n$ ,  $\frac{1}{2}h_n$ ,  $\frac{3}{4}h_n$ ,  $h_n$  и определяется из расчета. На рис.5а, 5б представлено нагружение ребра при двустороннем и трехстороннем присоединении.

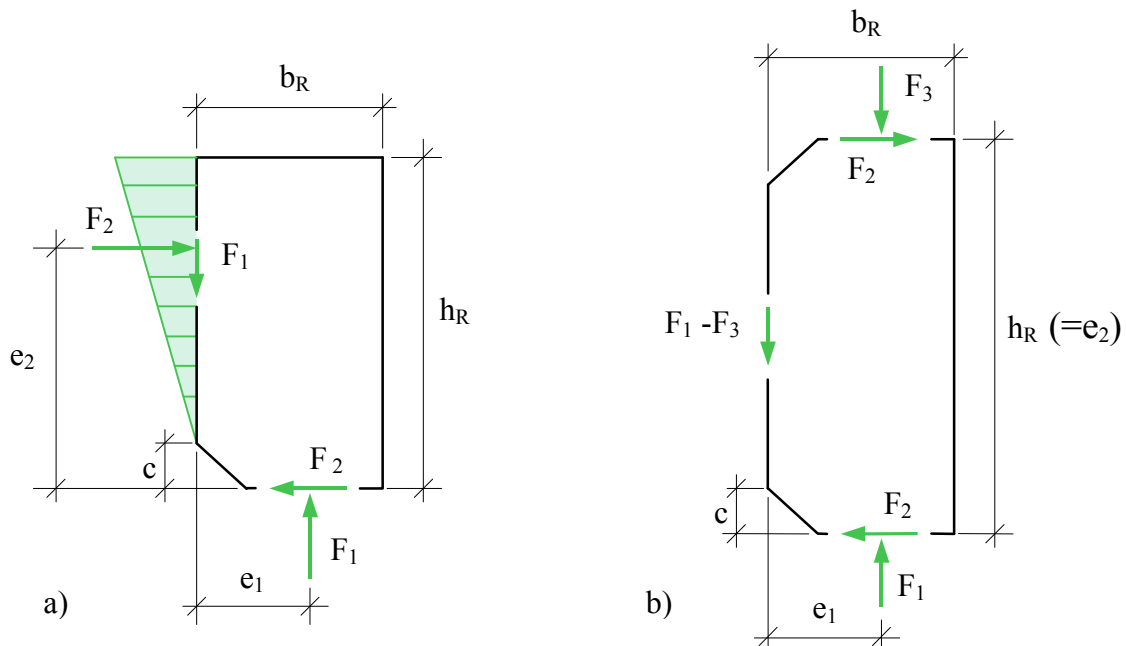


Рис. 5. Нагружение ребра

Принимается, что на нижней стороне ребра нормальные напряжения распределены равномерно (результатирующая  $F_1$ ), а на левой стороне ребра, при двустороннем присоединении, нормальные напряжения распределены по линейному закону (результатирующая  $F_2$ ). Сила на нижней стороне одного ребра вычисляется (в случае узла без усиления стенки) по формуле:

$$F_1 = \frac{F}{2b_R + s}(b_R - c)$$

Здесь  $b_R$  - ширина ребра,  $s$  - толщина стенки,  $c$  - размер скоса ребра. Плечи *результатирующих* определяются по формулам:

$$e_1 = \frac{b_R - c}{2} + c$$

$$e_2 = \frac{2}{3}(h_R - c) + c$$

Из условия равновесия следует, что

- при двустороннем присоединении

$$F_2 = F_1 \frac{e_1}{e_2}$$

- при трехстороннем присоединении

$$F_2 = (F_1 - F_3) \frac{e_1}{e_2}$$

При трехстороннем присоединении принимается, что на левой стороне ребра нормальные напряжения не возникают.

Требуемая толщина ребра  $t_R$  получается из проверки прочности ребра по приведенному напряжению  $\sigma_v = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$  ( $\sigma, \tau$  - нормальное и касательное напряжения). На нижней стороне ребра приведенное напряжение определяется по формуле:

$$\sigma_{v,1} = \frac{\sqrt{F_1^2 + 3F_2^2}}{t_R(b_R - c)}$$

Приведенное напряжение на левой стороне ребра рассчитывается следующим образом:

- при двустороннем присоединении по формуле

$$\sigma_{v,2} = \frac{\sqrt{3F_1^2 + 4F_2^2}}{t_R(h_R - c)}$$

- при трехстороннем присоединении по формуле

$$\sigma_{v,2} = \frac{\sqrt{3} |F_1 - F_3|}{t_R(h_R - 2c)}$$

Приведенное напряжение на верхней стороне ребра при трехстороннем присоединении определяется по формуле:

$$\sigma_{v,3} = \frac{\sqrt{F_3^2 + 3F_2^2}}{t_R(b_R - c)}$$

Проверка прочности сварных швов проводится по приведенному напряжению  $\sigma_{w,v} = \sqrt{\sigma_w^2 + \tau_w^2}$  ( $\sigma_w, \tau_w$  - нормальное и касательное напряжения в сечении сварного шва) при помощи следующих формул:

- при двустороннем присоединении

$$\sigma_{w,v,1} = \frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2}}{2(b_R - c)a}$$



$$\sigma_{w,v,2} = \frac{\sqrt{F_1^2 + 4F_2^2}}{2(h_R - c)a}$$

- при трехстороннем присоединении

$$\sigma_{w,v,1} = \frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2}}{2(b_R - c)a}$$

$$\sigma_{w,v,2} = \frac{|F_1 - F_3|}{2(h_R - 2c)a}$$

$$\sigma_{w,v,3} = \frac{\sqrt{F_2^2 + F_3^2}}{2(b_R - c)a}$$

При наличии усиления стенки узла, часть силы  $F$  воспринимается листом усиления. Отметим, что проектирование ребер не проводится, если сила  $F$  может быть воспринята только стенкой (возможно совместно с листом усиления).

В программе, при выводе катетов сварных швов ребер, применяются следующие обозначения:  $k_{fl}$  – катет шва между ребром и полкой слева,  $k_{fp}$  – катет шва между ребром и полкой справа,  $k_{fv}$  – катет шва между ребром и полкой сверху,  $k_{fn}$  – катет шва между ребром и полкой снизу,  $k_{fc}$  – катет шва между ребром и стенкой.

### 3.3 Проектирование несущей накладки

Конструкция Г-узла может содержать несущую накладку, работающую, как правило, на растяжение. Накладка передает на стенку узла силу, действующую в полке. Накладка приваривается к торцу одного из профилей (стойки или ригеля) и к полке другого профиля (ригеля или стойки соответственно). Сила в накладке (в сечении 1-1 на рис.3) определяется по формуле:

$$F = \frac{-M + N_n h_D}{h_f \cos \alpha}$$

где  $h_D$  - расстояние от оси профиля до середины сжатой полки. При этом предполагается, что  $F \cos \alpha - N_n \geq 0$ . Накладка также может нагружаться составляющей узловой силы. В этом случае, указанная сила  $F$  обозначается как  $F_n$  (или  $F'_n$ ), а сила от узловой нагрузки – как  $F_l$  (или  $F'_l$ ). Индексы  $n, n', l, l'$  соответствуют указанию положения: справа, снизу, слева, сверху. Сварные швы соединения со стенкой рассчитываются в предположении, что касательная сила  $T_c = F_n + F_l$  (или  $T_c = F'_n + F'_l$ ) воспринимается только этими сварными швами. При этом, согласно [1], п.12.8, учитывается ограничение расчетной длины сварного шва значением  $85\beta_f k_f$ . Это ограничение учитывается также для фланговых сварных швов, которыми накладка присоединяется к полке другого профиля.

В программе, при выводе катетов сварных швов накладки, применяются следующие обозначения:  $k_{fc}$  – катет шва между накладкой и стенкой,  $k_{fp}$  – катет шва между накладкой и полкой.

Помимо конструкции узла с несущей накладкой, предусмотрена конструкция, в которой роль несущей накладки играет полка. Сварные швы соединения полки со стенкой узла проектируются в этом случае так же, как для конструкции с несущей накладкой. В третьей форме исполнения узла, сила в полке передается на стенку узла через стыковой сварной шов и торцевую плиту. В выходном документе приводятся размеры плиты и катет сварного шва

соединения плиты со стенкой узла. Наряду с размерами плиты, указывается смещение плиты относительно внешнего края полки, которое обозначается через  $u$  (или  $u_w$ ).

### 3.4 Приварка профиля

Во всех конструкциях узла, один из профилей (ригель или стойка) по торцу приваривается к полке другого профиля (стойки или ригеля соответственно). Нормальные напряжения в сечении сварных швов определяются через нормальную силу  $N_n$  и изгибающий момент  $M$  следующим образом:

$$\sigma_w(z) = \frac{N_n(zS_y - I_y) - M(S_y - zA)}{S_y^2 - AI_y}$$

Здесь  $z$  – координата в плоскости изгиба,  $A$  – площадь сечения сварных швов,  $S_y$  и  $I_y$  – статический момент и момент инерции сечения сварных швов относительно оси  $y$ . Если  $S_y = 0$  (т.е. сечение сварных швов симметрично относительно оси  $y$ ), то формула принимает вид:

$$\sigma_w(z) = \frac{N_n}{A} - \frac{M}{I_y} z$$

При определении геометрических характеристик сечения сварных швов применяются расчетные толщины сварных швов.

Касательные напряжения определяются через поперечную силу  $Q_n$  или касательную силу  $T$  по формуле вида:

$$\tau_w = \frac{|Q_n|}{A_c}$$

где  $A_c$  – площадь сечения швов стенки. Предполагается, что касательные напряжения равномерно распределены по длине сварных швов стенки. Проверка прочности сварных швов проводится по приведенному напряжению  $\sigma_{w,v} = \sqrt{\sigma_w^2 + \tau_w^2}$ . Предусмотрено вычисление нормальных, касательных и приведенных напряжений во всех характерных точках сечения сварных швов.

На рис.6 изображены сварные швы верхней (или левой) полки для различных конструкций узла.

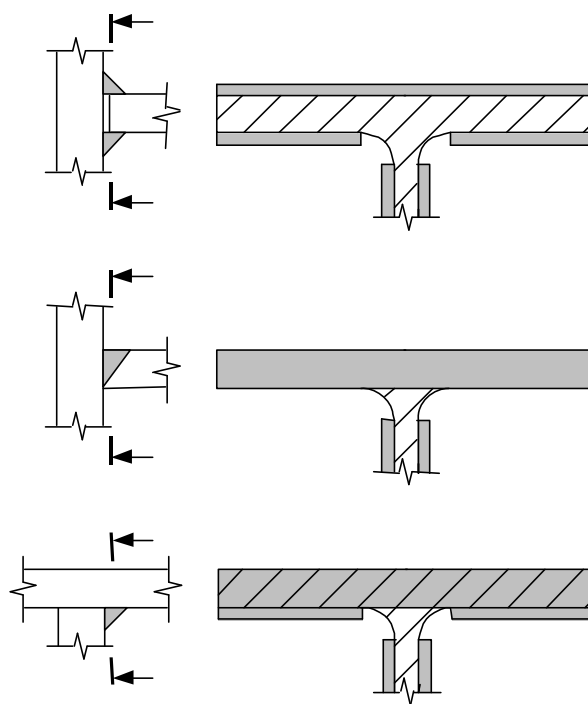


Рис. 6. Виды швов

## Литература

1. СНиП II-23-81\*. Стальные конструкции/Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.